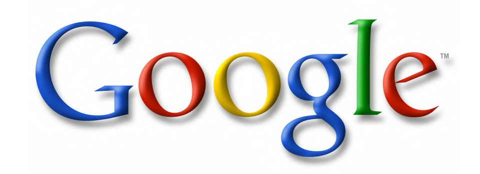

Google

GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME V

3ME PARTIE — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE I. — COMMENT ON PROJETTE UN PONT EN MAÇONNERIE
LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE
LIVRE III. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

BOURGES
IMPRIMERIE V^VE TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15
—
1914



3e PARTIE

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE

DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE I

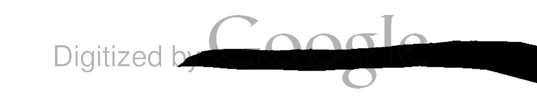
COMMENT ON PROJETTE
UN PONT EN MAÇONNERIE

LIVRE II

COMMENT ON EXÉCUTE
UN PONT EN MAÇONNERIE

LIVRE III

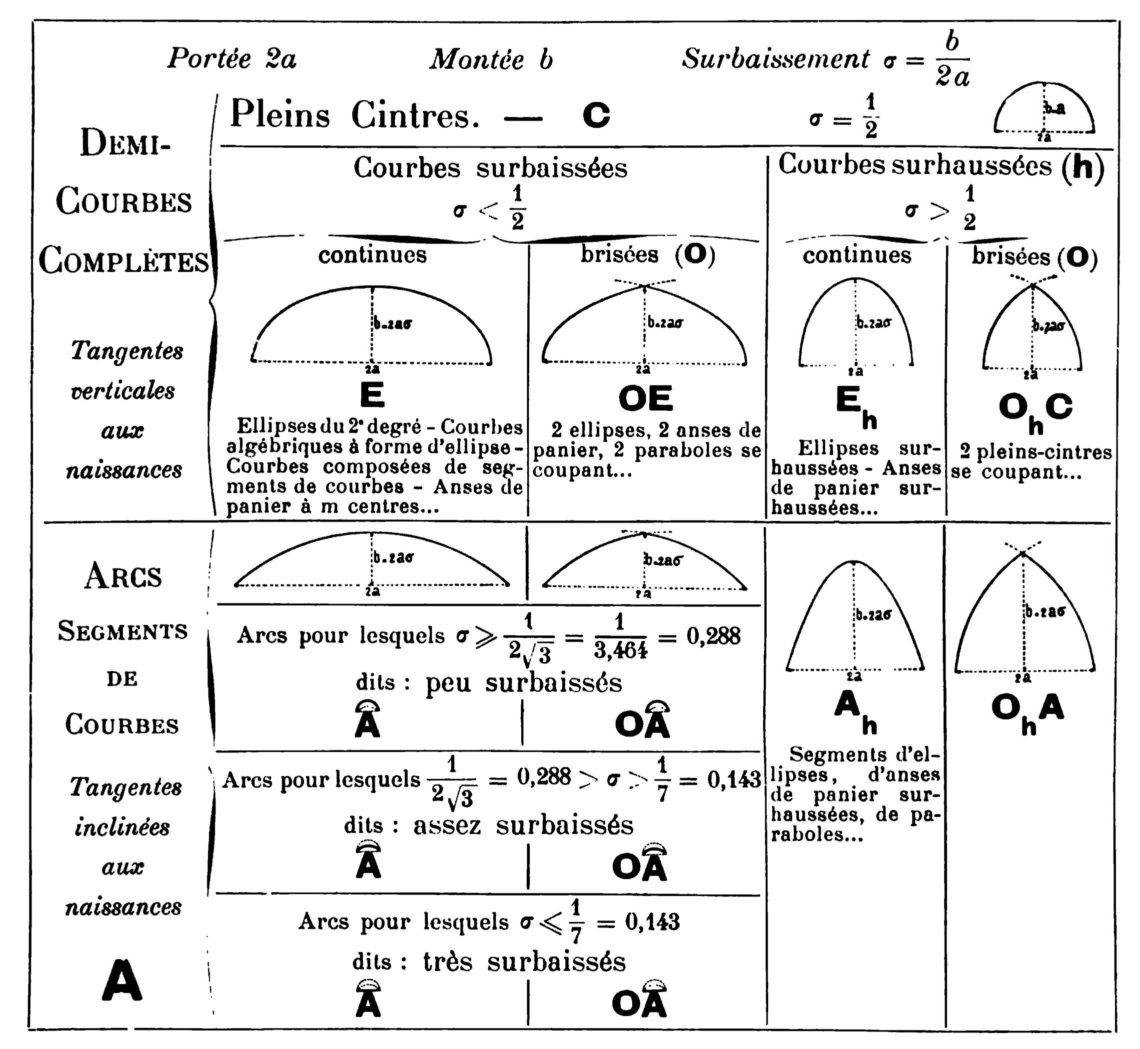
CONCLUSIONS GÉNÉRALES



PRÉLIMINAIRES[1]

SYMBOLES

1. — Intrados.



2. Ponts à une seule grande arche et ponts à plusieurs grandes arches. — On a distingué les ponts à une seule grande arche : **C**[1], **E**[1], **Â**[1] **Â**[1], **Â**... et les ponts à plusieurs : $\mathbf{C}^n$, $\mathbf{E}^n$, $\mathbf{\hat{A}}^n$, $\mathbf{\hat{A}}^n$, $\mathbf{\hat{A}}^n$,....

3. Voie portée.

Ponts-route : **C** r^te^, **E** r^te^, **A** r^te^,....
Ponts sous chemin de fer à voie normale : **C** F^r^, **E** F^r^, **A** F^r^,....
Ponts sous chemin de fer à voie étroite : **C** f^r^, **E** f^r^, **A** f^r^,....
Ponts-aqueducs : **C** aq, **E** aq,....

4. Ponts en deux anneaux. — Les voûtes sont désignées comme précédemment, mais en doublant la lettre de l'intrados, par exemple : **Â**[1] **Â**[1] r^te^....

1. — Résumé des *préliminaires* en tête des Tomes I, II, III.

LIVRE I

COMMENT ON PROJETTE

UN PONT EN MAÇONNERIE

MATÉRIAUX — APPAREIL — DISPOSITION

ASPECT — DÉCORATION

TITRE I

GRANDES VOÛTES EN PIERRE

MATÉRIAUX — APPAREIL — TRAVAIL

CHAPITRE I

DÉSIGNATION DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX [1]

LEUR DISTRIBUTION USUELLE DANS LES OUVRAGES [2]

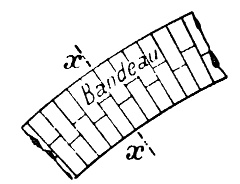
Désignation [1]	Dimensions usuelles (f_1) — En parement — Hauteur ou Épaisseur h	En parement — Largeur l	Queue q	Retour d'équerre — Lits r_1	Retour d'équerre — Joints r_2	Abréviations	Distribution usuelle
Béton.	»			»		**B**	Voir plus loin, Titre II.
Moellons ordinaires — employés en blocage sans préparation spéciale.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$ Poids $< 40^k$					**MO**	Gros œuvre; remplissages; massifs de fondation ; corps des culées ; noyaux des piles, tympans; murs en aile et en retour ; parements cachés ; parements vus, quand l'aspect n'importe pas.
Moellons ordinaires — choisis, (c'est-à-dire avec sujétion.) — employés en parement. — à joints incertains. « *opus incertum* ».	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m10$	$\geqslant 0^m10$	**MOI**	Parements vus des tympans, piles, culées, pieds-droits, murs en aile et en retour, radiers, murs de soutènement *(MOI ou MOH suivant la carrière).*
Moellons ordinaires — choisis — employés en parement. — par assises horizontales grossières.	$\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m15$	$\geqslant 0^m10$	**MOH**	
Moellons ordinaires — choisis — employés en voûte. — méplats, « lités » ; lits normaux à l'intrados ; assises prolongeant des assises de douelle.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$			aussi pleins que possible	0^m10	**MOV**	Queutage des voûtes derrière la douelle.
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan f_1 — Moellons équarris [3] — »	$\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	0^m20	0^m15	**ME**	Parements vus des tympans, piles et culées *(sauf les angles)* dans les grands ouvrages. Fût des parapets.
Moellons à face rectangulaire — Moellons équarris [3] — taillés en voussoirs	Fixée par le dessin $\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	Pleins	0^m20	**MEV**	Douelle des voûtes. Queutage des grandes voûtes.
Moellons à face rectangulaire — Moellons d'appareil [4] — »	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		**MA**	Angles des piles et culées des grands ouvrages. Couronnement des parapets.
Moellons à face rectangulaire — Moellons d'appareil [4] — taillés en voussoirs	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		**MAV**	Bandeaux des voûtes.
Libages. — Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		**L**	Socles des piles, soubassements.
Pierre de taille [5]. — Blocs appareillés sur les six faces. Toutes les dimensions imposées.	Dimensions indiquées aux dessins.			Pleins.		**PT**	Bandeaux et archivoltes des grandes voûtes. Crossettes d'appui des piles des voûtes d'évidement. Plinthes, sous-plinthes, corbeaux des refuges, balustres, parapets ajourés, dés à leurs abouts. Couronnement et chaperon des piles.
Briques.						**Br**	Voûtes, tympans, parapets.

1. — C'est, complétée, la nomenclature donnée dans l'Avertissement, en tête des Tomes I, II, III, IV.
2. — Pour les ouvrages courants et pour les viaducs, elle est détaillée à l'Appendice.
3. — Synonyme : Moellons têtués.
4. — Synonyme : Moellons smillés.
5. — Pierre de taille de petit appareil : Synonyme, moellons piqués.

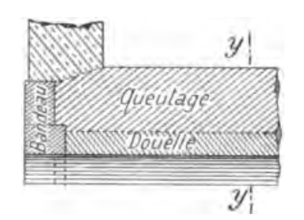
CHAPITRE II

COMMENT SONT FAITES
LES VOÛTES APPAREILLÉES DE 40^M ET PLUS [6, 7]

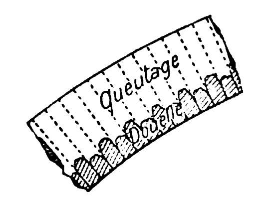
f_2 — Élévation



f_3 — Coupe sur xx de f_2



f_4 — Coupe sur yy de f_2



§ 1. — *VOÛTES ⩾ 40^m A MORTIER DE CHAUX*

Pont	Intrados Voie portée [8]	Monographie, Tome, page	Date	Portée	Surbaissement	Composition de la voûte — Appareil [9] — Bandeaux	Douelle	Queutage	Pierre — Nature	Résistance en Kg/0^m01^2	Chaux — Nature Provenance	Pour 1^{m3} de sable — Poids en Kg	Volume en litres	Pressions, Kg/0 — Clef — MAX.	moy.	Rei[ns] — MAX.
de Lavaur (Vieux Pont)	E^1 rte	I-97	1773-91	48^{m}73	1/2.5	P T			Grès mollasse tendre		ch. grasse					
de Gignac	E^1 rte	I-103	1776-1810	48.42	1/2.98				»		»					
Mosca	$\hat{A}^1$ rte	III-199	1834	45	1/8.18				Granit		ch. grasse de Palazzolo					
de Collonges	C^1 rte	I-31	1869-73	40	»			Reins en MOV	»		Virieu					
du Saulnier (écroulé en 1912)	$\hat{A}^1$ rte	III-40	1882	43	1/5	MAV		MEV	Grès calc.	300^k	Teil				14^{k}6	
de Pouch	$\hat{A}^1$ Fr	III-110	1890	47.85	1/3.68	PT			Granit	»	Teil	350^k				
de Fium' Alto	E^1 rte	I-110	1862-63	40	1/3.82	L	MOV	MOV		Queutage [10] 150^k	Teil	377^k				
de Pont-y-tu-Pridd	$\hat{A}^1$ rte	III-26	1749-50	42.67	1/4	PT	MOV	MOH	Bandeaux Grès dur Douelle Schiste							
de Chester	$\hat{A}^1$ rte	III-29	1833-34	60.96	1/4.76	PT	»	»	Bandeaux Marbre D^{lle} et Queut. Grès		du pays		500^l			
sur la Gravona	$\hat{A}^1$ fr	II-183	1884	43.53	1/2.59	PT	PT	»	Granit	600^k	Teil	333^k		26^{k}6		31^{k}8
des Bains-de-Lucques [11]	$\hat{A}^1$ rte	III-32	1845-47, 1874-77	47.84	1/6.71	PT	Br			Grès 490 à 625^k Br. 130 à 150^k	ch. maigre en pâte		666^l		16^{k}3	
de Calcio	$\hat{A}^1$ Fr	III-100	1877-78	42	1/3.53	Br			Briques pressées	335^k	ch. hydr. de Palazzolo	450^k		12^k		23^k
sur la Diveria	$\hat{A}^1$ Fr	III-130	1901-02	40	1/4	Br				450^k		400^k				
du Diable	E^1 rte	I-116	1871-72	55	1/4.06	Br				89^{k}6	ch. grasse ch. du Teil	[12]	333^l	15^{k}8	10^{k}6	10^{k}6

§ 2. — *VOÛTES ⩾ 40^m A MORTIER BÂTARD (CHAUX ET CIMENT)*

Pont	Intrados Voie portée	Monographie, Tome, page	Date	Portée	Surbaissement	Bandeaux	Douelle	Queutage	Pierre — Nature	Résistance	Chaux et Ciment : Nature Provenance	Poids	Volume	Clef MAX.	moy.	Reins MAX.
de Nydeck	$\hat{A}^1$ rte	II-51	1840-44	45.90	1/2.51	PT		MEV	Bandeaux et Douelle: Granit; Queutage: Grès	500^k; 211^k			ch. 400^l cim. 400^l			
de Wäldlitobel	$\hat{A}^1$ Fr	II-157	1883-84	41	1/3.10	M O V							500^l		12^{k}2	
d'Oloron	C^1 Fr	I-45	1881-82	40	»	PT	MEV	MOV				ch. 333^k cim. 111^k			11^{k}3	
Annibal	E^1 rte	I-112	1868-70	55	1/3.92	Br				52^{k}5		[12]	333^l			

6. — On a classé les voûtes d'après l'appareil du queutage, et pour le même appareil, par dosage décroissant du liant.
7. — 21 ponts à voûtes ⩾ 40^m n'ont pu, faute de renseignements, être inscrits aux tableaux § 1, 2, 3.
8. — Pour le sens des symboles, voir Préliminaires, p. 3. 9. — Pour le sens des abréviations, voir Chapitre I.
10. — Bandeaux et douelle : Calcaire à 300^k, mortier de ciment. 11. — Au-dessous de 33°, corps en calcaire. 12. — Sable : pouzzolane.

Les voûtes articulées sont en italiques.

Pont	Intrados Voie portée [13]	Monographie Tome, page	Date	Portée entre appuis	Portée aux retombées ou entre rotules	Surbaissement	Composition de la voûte: Appareil [14] Bandeaux	Appareil Douelle	Appareil Queutage	Pierre Nature	Pierre Provenance	Pierre Résistance en kg/0.01²	Ciment Nature Provenance	Ciment pour 1mc de sable Poids en Kg	Ciment pour 1mc de sable Volume en lit.	Epaisseur des joints, en mm	Pressions kg/0.01² Clef maxima	Clef moyenne	Reins maxima	Reins moyenne
				m	m															
de Teinach	$\hat{A}^1$ r^{te}	III-203	1882	46	33	1/10		PT		Grès		300^k	Portland	1000^k	[15]		29^{k}3		27^{k}5	
Cornélius	$\hat{A}^n$ r^{te}	IV-180	1902-03	44	41	1/12				Calcaire (Muschelkalk)	»	»					36		35	
Maximilien		IV-192	1903-05	45.87	44	1/8.98					Franconie	500 à 800^k					36	32^k	36	24^k
du Prince-Régent	$\hat{A}^1$ r^{te}	IV-239	1900-01	62.40	63	1/9.69							Portland Dyckerhoff et fils	700^k		25	41.7	»	43	»
Max-Joseph		IV-242	1901-02	64	60	1/10											»	»	45	»
de Signac (cerveau sur 22e)	E^1 F^r	I-131	1871-72	40		1/3.25				»	»	»	Boulogne	666^k	[16]			16.3		
de Höfen	$\hat{A}^1$ r^{te}	IV-41	1885	41	28	1/10				Grès		917 à 1036^k	Portland de Blaubeuren		666^l		29 [17]		24 [17]	
de Morbegno	$\hat{A}^1$ F^r	IV-65	1902-03	70	»	1/7				Granit		1100^k	»	600^k			69.4		70.1	
de Seythenex	$\hat{A}^n$ r^{te}	III-177	1908-11	41.19	»	1/4.10				»	Seythenex	1400 à 1600^k	Vicat n° 1				23		23	
de Salcano	$\hat{A}^1$ F^r	III-141	1904-06	85	»	1/3.90				Calcaire	Nabresina	1200^k	Portland 1er choix de Spalato	[18]	[19]	16	28		51	
de l'Empereur-François	E^n r^{te}	I-168	1898-1901	42.34		1/4.95				Granit	»						40.7		32.8	
sur le Schalchgraben	$\hat{A}^1$ F^r	II-168	1904-05	52		1/3.46							Portland		333^l		19.8		27.9	
sur la Steyrling		137	1904-05	70		1/4.45							Portland				Pr. maxima : 37^k			
de Langenbrand		152	1907-09	59		1/4										20	30.5		41.1	
sur la Gutach		122	1899-1900	64		1/3.97					Saverne	400 à 600^k	Portland Schifferdecker		[20]		»	»	»	»
sur le Schwändeholzdobel	$\hat{A}^1$ F^r	III 126	1899-1900	57		1/4				Grès [21]	»	»				18 au moins				»
de Jaremcze		114	1893-94	65		1/3.63						480 à 1180^k	Portland de Szczakowa (Galicie)		285^l		Pr. maxima			27.5
de Jamna		118	1893-94	48		1/4						»								25.1
de Worochta		120	1893-94	40		1/4						»								21.4
sur le Strandeelven		132	1902-04	41		1/3.64				Gneiss		1000 à 2700^k		1/3 [22]		25	20		35	
de Svenkerud		150	1905-07	44		1/6.66				Grès		900 à 1500^k		1/2,5 [23]			30.3		25.8	
de Bollefos		159	1908-..	40		1/4				Gneiss		1100 à 2100^k					20		30.8	
de Baiersbronn	$\hat{A}^1$ r^{te}	IV-48	1889	40	33	1/10				Grès bigarré		695^k					42		53	
de Huzenbach		III-206	1889	41.50	35	1/7.44				Grès		»					40		52	
d'Elyria	$\hat{A}^1$ r^{te}	III-46	1886	45.72		1/5.55		L		Grès	Elyria	437^k	Portland		1000^l	6.4	19.7		24.1	
de Céret	$\hat{A}^1$ F^r	II-160	1883-85	45		1/2.31				Granit		571 à 735^k	Grappier Lafarge	1000^k			Pr. maxima : 27^k			
de Montanges	$\hat{A}^1$ r^{te}	III-62	1908-09	80.29		1/3.92				Calcaire	Villette-Romanèche (Ain)	1974^k	Artificiel Vicat n° 1	600^k	[24,25,26]	12	43.8		50.2	
de Canale	$\hat{A}^n$ F^r	III-185	1904-06	40		1/5				Calcaire	»	»		590^k			Pr. maxima : 35^k			
de Krummenau	$\hat{A}^1$ F^r	III-164	1910-11	63.26		1/4.57				Grès calc. mollasse	»	1200^k	Portland	»	333^l	10 à 60	36.2 [17]	23.6 [17]	46.2 [17]	23.1 [17]
Edouard VII	E^n r^{te}	I-182	1901-03	40.54		1/5.43		[27]		Granit	»	»		»						
de Bellows-Falls	$\hat{A}^1$ F^r	III-225	1899	42.67		1/7		[27]		»	»	»	Portland	»			50.5		76	
de Wiesen	E^1_h f^r	I-235	1907-09	55		1/1.65	PT Granit	B moulé		1t - 1t8 - 3t5		332 à 404^k à 28 jours		400^k [28]			20.2		23.6	
de Luxembourg	$\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te}	II-67	1899-1903	84.65		1/2.73	PT	PT	MAV	Grès	Gilsdorf	1193 à 1599^k	Artificiel Vicat n° 1		[29]		29	23	48	20
Boucicault		243	1888-90	40		1/8				Calcaire	Villebois	1096^k				8		19.9		
d'Orléans	$\hat{A}^n$ r^{te}	III 255	1904-06	43.85		1/7.56					*Bandeaux et Douelle* Massangis; *Queutage* Ancy-le-Franc, Larrys, Chassigneules	710^k; 600 à 1100^k	lent Candlot	600^k			29.6	19.7	39.5	19.6
d'Avignon		270	1905-09	40		1/8					Ruoms		Maritime Pavin de Lafarge			Bx 10 Corps 25 à 30	31.5		37.2	
de Constantine	$\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te}	II-107	1908-12	68.76		1/2.76					»		Artificiel Vicat de Valdonne			12 à 16	29	»	»	»
de Cinuskel	$\hat{A}^1$ f^r	II 189	1910-12	46.98		1/2.32	MAV			Granit	»			350^k			22.8	17.5	24.5	20.4
de Tuoi		194	1911-12	47.71		1/2.23					»									

13. — Voir renvoi 8. 14. — Voir renvoi 9. 15. — A la clef et aux retombées, 1500^k. 16. — Au-dessous du milieu de la montée, 300^k.
17. — En tenant compte de la température. 18. — Résistance du mortier en cubes : 255^k. 19. — Sable de l'Isonzo, lavé.
20. — Sable de la Gutach. 21. — Grès poreux, gélif. 22. — 11 °/o de mortier. 23. — 23 °/o de mortier. 24. — 250 à 300^k à 28 jours.
25. — Mortier avec très peu d'eau. 26. — Sable de la Valserine. 27. — Voussoirs de toute l'épaisseur de la voûte.
28. — Résistance du mortier au 1/3 : 426^k à 28 jours. 29. — Sable : laitier granulé.

Pont	Intrados Voie portée [30]	Monographie Tome, page	Date	Portée entre appuis	Portée aux retombées ou entre rotules	Surbaissement	Appareil [31] Bandeaux	Appareil Douelle	Appareil Queutage	Pierre Nature	Pierre Provenance	Pierre Résistance en Kg/0m01²	Ciment Nature Provenance	Pour 1m3 de sable Poids en Kg	Pour 1m3 de sable Volume en lit.	Épaisseur des joints, en mm	Pressions Clef MAXIMA	Pressions Clef moyenne	Pressions Reins MAXIMA
				m	m											Bx / Delle			
du Castelet		130	1882-83	41.20		1/2.94				Granit	Ax					12 / 20		14k	
de Lavaur	Â1 Fr	II 135	1882-84	61.50		1/2.24	PT	MEV		Calcaire	*Bandeaux* Quercy; *Douelle et Queutage* Lexos	» ; 720 à 1127k	Artificiel	650k	[32]	10 / 15		17	Max dans la voûte 23k
Antoinette		145	1883-84	50		1/3.14					Sidobre	691 à 977k			[32]	10 / 12		18	id. 2?
du Gour-Noir	Â1 Fr	III-103	1888-89	62	60	1/3.73				Granit	Cabirol			[33]			33k2	16.6	»
de Verdun-sur-le-Doubs	En rte	I-165	1895-97	41		1/4.47	MAV				*Bandeaux et Douelle* Ruoms; *Queutage* Remigny		Vicat					13.5	
de Valence	En rte	I-173	1901-05	49.20		1/4.65	PT	MAV			*Bandeaux et Douelle* Ruoms, Le Pouzin; *Queutage* Crussols, Variza		n° 1	600k			27.9	18.8	30.6?
des Amidonniers	EnEnrte	I-193	1904-07	46 et 42		1/4.17 et 1/4.80	PT	MEV		Calcaire	Vianne				[34]	Joints minces	40	27	50
d'Escot	Â1 Fr	II-174	1907-09	56		1/2.99	MAV	MEV	MEV		»		Laitier				36.3		37
de Marbach	Ā1 rte	IV-45	1886-87	43.50	32	1/10.32	PT	MEV		*Bandeaux* Calcaire Keuper; *Douelle et Queutage* Muschelkalk		577 à 644k; 992 à 1169k			500l		27		25
de Freyssinet	Â1 Fr	III-112	1890-91	45		1/4.09	PT			Granit	»	»	Boulogne	500k					
de Rébuzo	C1 Fr	I-48	1898-1900	40		»		MEV		Calcaire	*Bandeaux et Douelle*; *Queutage*	1900k; 1700k	Grappier du Teil	[35]				11.4	
de Ramounails	Â1 fr	II-186	1906-08	40.30		1/3.12				»			»	400k			23.2	11.6	20.?
de Brent	C1 rte	I-34	1899-1900	44		»	MAV			*Bandeaux et Douelle* Calcaire				[37]				13	
sur le Verdon	E1 Fr	I-133	1905-06	40		1/4	PT	MEV		»			Artificiel lent	»	»			14.5	
de Lichtensteig	Â1 Fr	III-161	1907-09	42.82		1/3.71	MAV			Grès calc.			Portland	»	333l		27.5		28.?
de l'Alma	En rte	I-153	1854-55	43		1/5	PT	MAV		*Douelle et Queutage* Meulière			Vassy		1000l				
de Claix	Â1 rte	III-36	1873-74	52		1/6.46		MEV					Artificiel Vicat n° 1	1000k				19k	
sur le Rothweinbach	Â1 Fr	II-171	1904-06	41		1/2.68				Calcaire				500k env. (1/3 en poids)			Pr. maxima		
sur le Krenngraben	Â1 Fr	III 134	1904-05	40		1/4	MEV			*Bandeaux et Douelle* Calc. dur; *Queutage* Granit			»				Pr. maxima		
de Lusserat		III 155	1908-10	45.70		1/4.63	PT	MAV		Calcaire			Portland de Boulogne	450k		10 à 30	28	18	25
sur le Palmgraben	Â1 Fr	II-164	1904-05	49		1/3.39		PT		Grès							Pr. maxima		
de Solis	C1 fr	I-55	1901-02	42		»	MEV			Calcaire				400k			23.2		20.3
de Saint-Sauveur	C1 rte	I-27	1860-61	42		»	PT	MOV	[36]	Schiste			Vassy						
de Mantes	En rte	I-160	1873-75	40		1/3.5	PT			*Queutage* Meulière	*Bandeaux et Douelle* Tessancourt, Saillancourt		Portland Lonquéty de Boulogne						
de Berdoulet	Â1 Fr	II-128	1860-61	40		1/3.44	L												
de Chemnitz	Â1 Fr	III-129	1901-02	45		1/5.23	»												
de Göhren	Ā1 rte	IV-139	1903-04	60		1/8.88			MOV						400l		35.7	34.9	40.2
de Plauen	Â1 rte	III-52	1903-05	90		1/5	Crépi avec joints simulant la PT			Schiste dur (Phylitte)		1580k	Cerveau : Stern; Reins et Culées : Vorwohler		Cerveau 333l; Reins 250l		32.4		53.4; 69 [39]
de Wengern	Â1 rte	III 207	1904	50		1/9.10											20k		
de Ziegenhals		III 208	1905	40		1/9.52													
de Michelau		III 209	1905-06	42		1/8.07											22		29.4
de Neuhammer		III 211	1906	52		1/8.7													
de Schwusen		III 213	1907	48		1/8.35									333l				
de Kupferhammer		III 214	1907	48		1/8.35											Pr. maxima : 3?		
de Krappitz	Ān rte	III 265	1905	50		1/8.33													
de Gross-Kunzendorf		III 267	»	40		1/9.52													
Saint-Pierre	E1 rte	I-120	1886	40		1/3.33	PT			Calcaire	Lexos	800k						11.5	
de Putney	Ān rte	III-239	1882-83	43.89		1/7.46	PT			*Bandeaux* Granit			Portland						

30. — Voir renvoi 8. 31. — Voir renvoi 9. 32. — Sable de l'Agoût. 33. — Au-dessous de 48°46', ciment 800k. 34. — Sable de la Garonne.
35. — Au-dessous de 65°, chaux du Teil 350k. 36. — Sans surcharge. 37. — Au-dessous de 60°, chaux 350k. 38. — 5 chaînes de pierre de taille. 39. — Voir renvoi



CHAPITRE III

MATÉRIAUX

§ 1. – *PIERRES*

Art. 1. — Nature. — Dans les grandes voûtes, on a employé à peu près toutes [40] les pierres naturelles, sauf les tendres [41, 42] : granit [44], gneiss [45], schiste [46], basalte [43], lave [47], calcaire [48], grès [49], meulière [50]..., toutes les artificielles : briques [51], béton moulé [52], béton damé [53].

Art. 2. — Écarter les matériaux sensibles aux intempéries. Il faut écarter les matériaux qui craignent la gelée, la pluie, l'humidité [54], l'air salin [55], les fumées [56]...

On étudiera utilement les pierres des cimetières : elles sont fort exposées au froid, à l'humidité, et portent une date.

S'il n'y a dans le pays que des pierres gélives, on les entourera de pierres qui ne gèlent pas [57].

40. — Voir les tableaux du chapitre II. 41. — Vieux Pont de Lavaur en grès mollasse tendre (1, p. 97).

42. — Viaduc sur lequel la ligne de Paris à Bordeaux traverse, près de Libourne, la vallée de la Dordogne. 100 arches de 10ᵐ en anse de panier au 1/3, en calcaire tendre, de 0ᵐ70 à la clef. Construit de 1846 à 1850. De nombreuses lézardes ont apparu dès les premières années, puis augmenté avec le poids et la vitesse des trains.

En 1900, il y en avait près de 150 ; certaines avaient 5, 6ᵐ de long, 15 à 20ᵐᵐ de large ; la plupart parallèles aux têtes, les plus grandes près de l'axe. Les pierres, le mortier, se sont écrasés, effrités, sous les trains.

Revue Générale des Chemins de fer, février 1913, p. 87 et suivantes : « *Consolidation par injection de ciment du Viaduc des Cent arches* », M. Adam, Ingénieur de la Cᶦᵉ d'Orléans.

43. — Viaducs d'Auvergne.

Voûtes appareillées ⩾ 40ᵐ, tout ou partie en :

44. — *Granit.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Krenngraben	40ᵐ	III	134
Edouard VII	40.54	I	182
Castelet	41.20	II	130
Empereur-François	42.34	I	168
Gravona	43.53	II	183
Putney	43.89	III	239
Mosca	45	III	199
Céret	45	II	160
Freyssinet	45	III	112
Nydeck	45.90	II	51
Londres	46.33	I	147
Tuoi	47.71	II	194
Pouch	47.85	III	110
Victoria	48.77	II	201
Antoinette	50	II	145
Schalchgraben	52	II	168
Wiesen	55	I	235
Langenbrand	59	III	152
Cabin-John	67.10	III	75
Morbegno	70	IV	65
Steyrling	70	III	137

45. — *Gneiss.*

Boïlefos	40	III	159
Strandeelven	41	III	132

46. — *Schiste.*

Sᵗ-Sauveur	42	I	27
Pont-y-tu-Pridd	42.67	III	26
Plauen (schiste dur, phylitte)	90	III	52

47. — *Lave.*

Vieille-Brioude	45	I	23

48. — *Calcaire.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Rébuzo	40ᵐ	I	48
Fium' Alto	40	I	110
Sᵗ-Pierre	40	I	120
Krenngraben	40	III	134
Canale	40	III	185
Boucicaut	40	III	243
Avignon	40	III	270
Verdun-sur-le-Doubs	41	I	165
Rothweinbach	41	II	171
Vizille	41.08	I	93
Solis	42	I	55
Marbach	43.50	IV	45
Orléans	43.85	III	255
Cornelius	44	IV	180
Lusserat	45.70	III	155
Maximilien	45.87	IV	192
Amidonniers	46	I	193
Claix (Vieux Pont)	46.35	II	42
Cinuskel	46.98	II	189
Vérone	48.70	III	173
Valence	49.20	I	173
Escot	56	II	174
Chester	60.96	III	29
Lavaur	61.50	II	135
Prince-Régent	62.40	IV	239
Max-Joseph	64	IV	242
Constantine	68.76	II	107
Montanges	80.29	III	62
Salcano	85	III	141

52. — *Béton moulé.*

Wiesen	55	I	235

53. — *Béton damé.*

Voir plus loin, Titre II.

49. — *Grès.*

Ponts :	Portée	Monographie Tome	Monographie Page
Baiersbronn	40ᵐ	IV	48
Worochta	40	III	120
Höfen	41	IV	41
Huzenbach	41.50	III	206
Pont-y-tu-Pridd	42.67	III	26
Lichtensteig	42.82	III	161
Saulnier	43	III	40
Svenkerud	44	III	150
Elyria	45.72	III	46
Nydeck	45.90	II	51
Teinach	46	III	203
Londres	46.33	I	147
Jamna	48	III	118
Lavaur (Vieux Pont)	48.73	I	97
Victoria	48.77	II	201
Tournon	49.20	II	35
Palmgraben	49	II	164
Schwändeholzdobel	57	III	126
Chester	60.96	III	29
Krummenau	63.26	III	164
Gutach	64	III	122
Jaremcze	65	III	114
Cabin-John	67.10	III	75
Luxembourg	84.65	II	67

50. — *Meulière.*

Mantes	40	I	160
Alma	43	I	153
Nogent-sur-Marne	50	I	79

51. — *Briques.*

Maretta, Prarolo	40	III	93
Isola del Cantone	40	III	98
Diveria	40	III	130
Crespano	40.40	II	46
Calcio	42	III	100
Bains-de-Lucques	47.84	III	32
Vérone	48.70	III	173
Annibal	55	I	112
Diable	55	I	116

54. — L'ancien pont de Vieille-Brioude, tombé en 1822, était en tuf volcanique, s'effritant dans l'air humide (II, p. 17,-5, renvoi 12).

55. — Briques attaquées par l'air salin.

Giornale del Genio Civile, mars 1902 : p. 114 à 122 : « *Sulle corrosioni delle murature di matoni dorute alla presenza dei solfati alcalini.* »

56. — Grès de la cathédrale de Cologne attaqué par les fumées des usines, des locomotives, des bateaux.

Oesterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 28 septembre 1907, p. 616. « *Der Zahn der Zeit am Kölner Dome.* » J. L. Algermissen — Köln-Riehl.

57. — Ponts de Lavaur et Antoinette : les noyaux des piles, les massifs des culées enfouis dans le sol sont en grès tendre gélif.

Art. 1. — Sable. — On a employé du sable de rivière[58], de carrière[59], de la pouzzolane[60, 68], du laitier granulé[61]; on a broyé du calcaire[62, 63, 64], du grès[65], du granit[66, 67, 68], du gneiss[68], du basalte[68], de la pouzzolane[67],.....

Art. 2. — Anciens mortiers de chaux grasse et mortiers actuels. Avant le XIXe siècle, on ne connaissait que la chaux grasse[69] et on lui demandait

58. — Lavaur, (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), Gutach (III, p. 122), Salcano (III, p. 141), Amidonniers (I, p. 193), Montanges (III, p. 62).....

59. — Sable de gore : Viaduc de Mussy (Ligne de Paray-le-Monial à Lozanne).

60. — Annibal (I, p. 112), Diable (I, p. 116), Viaducs de la ligne de Langogne au Puy (1904-08).

61. — Luxembourg (II, p. 67).

62. — Constantine (II, p. 107).

63. — «... *les maçonneries du canal de la Marne à la Saône... ont été exécutées en grande partie, en totalité même dans les dernières années, avec du sable artificiel obtenu par le broyage de pierres calcaires...*

Ce sable artificiel n'est pas suffisamment connu. Il est pourtant supérieur, à tous les points de vue, à presque tous les sables naturels. Les expériences comparatives poursuivies pendant vingt ans à nos laboratoires de chantiers et surtout au laboratoire dirigé avec tant d'autorité par M. Féret, à Boulogne-sur-Mer, ont été absolument concluantes à ce sujet. »

Génie Civil, 10 octobre 1908, p. 397, « *Le canal de la Marne à la Saône* », p. 396 à 400. M. O. Jacquinot, Ingénieur en chef des Ponts-et-Chaussées.

M. Canat, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Cie P.-L.-M. a fait pour le grand viaduc de Caronte (Miramas-L'Estaque) de nombreux essais : chaux, sable siliceux des plages de Saint-Raphaël et Saint-Tropez, le meilleur du Sud-Est, — calcaire broyé : il a trouvé celui-ci 2 fois plus résistant.

Dans les essais faits pour la ligne de Nice à Coni, le calcaire broyé, avec ciment Pelloux, a été trouvé 3 fois plus résistant que le sable fin du Var.

M. Bied, Directeur du Laboratoire Pavin de Lafarge a reconnu de même que le sable concassé de Notre-Dame de la Garde valait mieux que le sable de mer.

64. — Lignes de Miramas à L'Estaque, de Morez à Saint-Claude, de Frasne à Vallorbe, de Nice à Coni.

65. — Viaducs de la ligne de Limoges à Brive.
(Rapport sur la Construction des Travaux, p. 29, 34.)

66. — Lignes de Saint-Bonnet à Craponne, d'Arlanc à Darsac.

67. — Ligne de Langogne au Puy.

68. — Ligne de Brioude à Saint-Flour.

69. — Voici les résistances à la compression des anciens mortiers et des nôtres :

	Liants	Expériences faites au Laboratoire :	Mortier — Composition	Mortier — Consistance	Résistance, en kg/0m01², à — jours 7	mois 1	mois 3	mois 6	ans 1	ans 1½	ans 2	ans 3	ans 16
anciens	Chaux grasse de Marly employée au Panthéon	» par Rondelet en 1787 et 1802	Chaux 1vol, Sable 1vol5	non battu						31			
				battu						42			47
			Chaux...... 1vol, Tuileau pilé 1vol5	non battu						48			
				battu						65			81
modernes — chaux	du Teil (Lafarge, ficelle blanche)	de la Société Pavin de Lafarge	Sable normal de Leucate 1mc et chaux 250k	plastique		13	22	42					
			et chaux 300k			17	33	45					
			et chaux 350k			18	34	52					
			Chaux 1k, Sable 3k (environ 500k de chaux pour 1mc de sable)		10	30	83	117	141	171	176	177	
					moyenne de 4.000 essais				200 essais				
	du Teil-maritime				88	132	217	290	303	330	302	365	
modernes — ciments	du Teil Lafarge n° 1 ficelle blanche		Ciment 1k Sable 3k (environ 500k de ciment pour 1mc de sable)	plastique	101	148	220	282	308	427	311	376	
					moyenne de 2.000 essais				100 essais				
	Artificiel Lafarge au four rotatif	des Arts et Métiers Paris, 1914			204	358	441						
	Artificiel Vicat n° 1 double cuisson	de l'École des Ponts-et-Chaussées Paris 1911 — en briquettes			291	356							
		de l'École des Ponts-et-Chaussées Paris 1911 — en cubes			186	251							
		de la Société Vicat (pendant 8 ans) — en cubes			135	210	325		367				
	Allard et Nicollet	des Arts-et-Métiers Paris 1903			194	273	363		425				
		de l'École Polytechnique de Zurich — 1908			121	210							
	Demarle-Lonquéty Usine de la Souys près Bordeaux	des Arts-et-Métiers Paris 1911 — en briquettes			237	425	418						
		des Arts-et-Métiers Paris 1911 — en cubes			125	247	343						

tout autant[70] qu'aujourd'hui aux excellents ciments que nous devons à Vicat.

Les grandes voûtes du XVIIIe siècle sont en pierre de taille à joints minces.

De nos excellents mortiers, on peut accepter beaucoup plus dans les voûtes.

La plus grande, celle de Plauen, est en tout petits matériaux de 10 à 12^{cm} d'épaisseur : elle contient 45 % de mortier.

On demande de plus en plus au mortier, de moins en moins à la taille.

Art. 3. — Augmentation de résistance du mortier en joints minces.

— Les essais de laboratoire donnent la résistance à l'écrasement r du mortier en briquettes normales de 22^{mm} d'épaisseur : en joints de 10^{mm} à 15^{mm}, elle dépasse 1,20 r[71].

Art. 4. — Faire au ciment les grandes voûtes.

— Toutes les voûtes de 40^{m} et au-dessus ont été construites : avant 1854, à mortier de chaux ; après 1890, à mortier de ciment à prise lente[72].

Nous avons fait en chaux, des pleins cintres de 25^{m}, 27^{m}, 35^{m} ; mais en ciment, des arcs de 33^{m} à 1/7,5..... On ne fera qu'en ciment une voûte de 40^{m}.

Art. 5. — Dosages usuels pour un m. c. de sable.

A. Chaux[73] : 400^{k}[73, 74], 350^{k}[73], 333^{k}[75], 300^{k}[76] ;

B. Ciment[77] : 700^{k}, 650^{k}, 600^{k}, 500^{k}, 400^{k}, 350^{k}[78], 333^{l}.

On cherchera, dans chaque cas, le dosage du liant et le sable qui donne le plus de résistance[79].

70. — Ponts de : Trezzo (1370-77, détruit en 1416, — $72^{m}25$), (III, p. 19); Vieille-Brioude (1454, tombé en 1822; — $54^{m}20$) (II, p, 15) ; Lavaur (1773-1790, — $48^{m}72$) (I, p. 97); Gignac (1777-1810, — $48^{m}42$) (I, p. 103).

71. — Briquettes en **8** de 22^{mm} d'épaisseur, $35^{cq}3$ de surface horizontale, 5^{cq} de section transversale au milieu.

Quand on écrase des cubes de mortier, les faces latérales « soufflent ». En briquettes normales de 22^{mm} d'épaisseur, le mortier résiste déjà de 1 fois 1/2 à 2 fois, comme en cubes ; en joints très minces, c'est-à-dire sans surfaces latérales pouvant souffler, le mortier, retenu par frottement entre les deux lits de la pierre, résiste de 2 à 4 fois comme en cubes. — Voici le résumé des essais faits à l'Ecole des Ponts, sur du mortier de ciment de Boulogne (Demarle et Lonquety) au dosage en poids de 1 de ciment pour 3 de sable normal (500^{k} par m. c. de sable) à consistance plastique.

			A 28 JOURS	A 84 JOURS
Charge d'écrasement.		en cubes de $0^{m}07$	95 k.	142 k.
		en briquettes normales en **8** de 22^{mm} d'épaisseur	170 k.	»
		Rapport à la résistance en cubes	1,8	»
Charge produisant un commencement de désagrégation.	En joint de 15^{mm}	comprimé	188 k. à 270 k.	272 k. à 305 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	2 à 2,8	2,8 à 3,2
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,1 à 1,6	1,6 à 1,8
	En joint de 10^{mm}	comprimé	224 k. à 283 k.	270 k. à 389 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	2,4 à 4	2,8 à 4,1
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,3 à 1,4	1,6 à 2,3
		non comprimé	182 k. à 238 k.	265 k. à 332 k.
		Rapport à la résistance. en cubes de $0^{m}07$	1,9 à 2,5	2,8 à 3,5
		Rapport à la résistance. en briquettes en **8**	1,1 à 1,4	1,6 à 2

Communication faite par M. H. Tavernier, au Congrès des méthodes d'essais tenu à Paris du 9 au 16 juillet 1900.

72. — sauf, en 1901-02, celle en briques, de 40^{m}, sur la Diveria (III, p. 130), qui est à mortier de chaux (Voir Chap. II, § 1).

73. — Voir Chap. II, § 1.

74. — Ouvrages à mortier de chaux de la ligne du lac de Constance au lac de Zurich : chaux 1^{vol}, sable 2^{vol}.

75. — Viaduc de Mussy (arches de 25^{m}), Ponts de l'Arconce (25^{m}), du Sornin (35^{m}). (Ligne de Paray-le-Monial à Lozanne),.....

76. — Avec la chaux du Teil, on est descendu à 250^{k} aux viaducs de la ligne de Limoges à Meymac, pour les tympans du pont de Luxembourg (II, p. 69, 12-*B*), à 200^{k}, même à 150^{k} pour des maisons.

77. — Voir Chapitre II, § 3 et 3 bis.

78. — Les voûtes du Métropolitain sont en meulière ou en pierre de Souppes à mortier de ciment de laitier : 350^{k} pour 1^{mc} de sable.

79. — Voir les essais faits pour le Pont de Luxembourg (II, p. 69).

Art. 6. — Mortiers bâtards (chaux et ciment) [80, 81, 82]. — On peut accepter le mélange, mais à condition qu'il soit très intime, c'est-à-dire que les deux poudres, chaux et ciment, soient mélangées mécaniquement avant usage.

Art. 7. — Fabrication. — Pour les grands ouvrages, on fera le mortier au manège (roues broyeuses pesant au moins 25^k par $\overline{0^m01}^2$ de largeur de jante).

Art. 8. — Protection du mortier.

A. - Contre la gelée. — Quand il faut maçonner par le froid, on ajoute à l'eau du mortier du carbonate de soude (1^k de sel anhydre pour 12 litres d'eau) : cette dissolution ne gèle pas à — 12° [83].

Pendant quelques mois, le carbonate [84] maintient humides les maçonneries : ce n'est un inconvénient que pour les murs à enduire de plâtre.

B. - Contre les eaux contenant du sulfate de chaux. — Les eaux gypseuses ramollissent les mortiers, les mettent en bouillie.

Il faut :

1° - les écouler promptement par des chemises à pierres sèches séparant complètement les maçonneries des terrains gypseux. On ne mettra pas de maçonnerie à mortier en contact direct avec le gypse ou les remblais gypseux [85].

2° - n'employer que du gros sable (2^{mm} à 5^{mm}) : les mortiers de sable fin se laissent plus facilement attaquer.

3° - avoir des mortiers très pleins et compacts [86], pour que l'eau n'y puisse pas entrer : du gros sable sans gypse, du ciment inattaquable par le gypse [87, 88]; faire le mortier au manège avec de l'eau sans gypse.

80. — Voir le Tableau, Chapitre II, § 2.

81. — Viaduc de Pompadour (1873-75) (Ligne de Limoges à Brive - Voûtes de 25^m). — Sur 6^m de chaque côté de la clef, on a ajouté à la chaux 150^k de ciment Portland par m. c. de mortier. *(Rapport sur la Construction des Travaux*, p. 29).

82. — Pont de Mauzac sur la Dordogne (1877-79) (Ligne de Bergerac au Buisson - 7 arches en ellipse; Portée 30^m, montée 9^m20). Sur 4^m de chaque côté de la clef, on a ajouté à la chaux 200^k de ciment Portland par m c. de mortier. *(Rapport sur la Construction des Travaux*, p. 23).

83. — Ont employé avec succès ce procédé, les Compagnies de l'Est, de l'Ouest, d'Orléans, PLM.

Les mortiers carbonatés se recouvrent d'efflorescences blanches : elles disparaissent au bout d'un ou de deux ans.

La dissolution du sel se fait dans une grande marmite où l'eau est portée à 40° : c'est là qu'on la puise pour faire le mortier.

Avec le sel hydraté (le « cristau » des ménagères), au lieu du sel anhydre, il faut 1^k de sel pour 4 litres d'eau.

84. — On a employé aussi le sel (une solution à 20 % gèle à — 14°), le chlorure de calcium...

85. — On rencontre souvent le gypse : en France (Lignes de Saint-Girons à Foix, d'Anduze à Saint-Jean-du-Gard, de Moûtiers à Bourg-Saint-Maurice, de Nice à Coni,...) ; en Algérie ; en Espagne (Ligne de Linarès à Alméria).

Depuis qu'on y veille, on trouve du gypse plus souvent qu'on ne le souhaite.

86. — Par des essais, on détermine pour chaque sable le dosage du liant qui donne la « compacité » maxima (volume du liant + volume du sable dans l'unité de volume du mortier). Ç'a été 600^k (ciment Pelloux n° 2) pour le calcaire broyé employé sur les lignes de Frasne à Vallorbe, et de Nice à Coni.

87. — Dans le gypse et l'anhydrite, nous avons employé le ciment « indécomposable » Lafarge aux dosages de 500^k et 600^k pour les maçonneries, de 800^k pour les chapes, — puis le ciment Pelloux « spécial n° 2 » aux dosages de 450^k, 600^k, 650^k, 780^k pour les maçonneries, de 800^k pour les chapes.

En Algérie, dans les eaux très sulfatées, M. l'Inspecteur général L. Godard met par m. c. de sable 1000^k de ciment maritime Lafarge.

88. — Le ciment qui résiste aux eaux sulfatées résiste moins que d'autres à l'écrasement.

Art. 9. — Joints du parement. — Dans les parements en bonne pierre, les joints en mortier sont la partie faible [89]. Il faut les tenir en arrière, — « rejointoyer » à plat, en creux, — et non pas, comme on l'a trop souvent fait, soit à niveau, soit surtout en saillie : c'est laid et cela part au premier hiver.

On rejointoye à fleur de pierre : les pierres tendres, elles ne résistent pas plus que le mortier, il n'y a plus de raison de le tenir en arrière; les moulures, pour ne pas en interrompre les lignes.

La couleur du joint doit aller avec celle de la pierre : joints clairs sur les archivoltes moulurées blanches ; joints foncés sur les pierres noires.

CHAPITRE IV

DISPOSITION DES MATÉRIAUX. — APPAREIL

§ 1. — *PARTOUT, DANS UN OUVRAGE, ON DOIT DISPOSER LES MATÉRIAUX PAR ASSISES NORMALES A LA PRESSION*

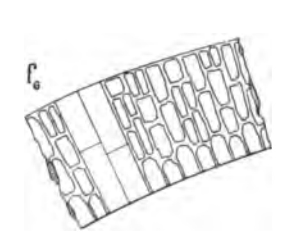
Art. 1. — Pourquoi ? — Considérons une section quelconque A B dans une voûte, une pile, une culée : soit R la résultante des actions qui agissent sur elle (f_5).

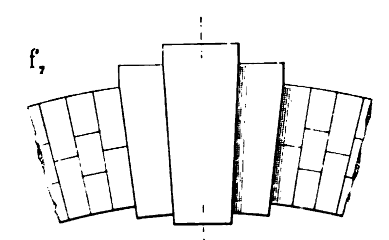
Les matériaux, pour ne pas glisser, doivent être disposés perpendiculairement à R.

Si, dans l'assise A B, il y a des parties plus compressibles, elles tendront à s'enfoncer par rapport aux autres, à s'en séparer.

Donc, n'avoir dans une assise que des matériaux également compressibles.

Normalement à R, on peut, comme on veut, changer l'appareil : par exemple, traverser une voûte en moellons bruts, par des chaînes de pierre de taille (f_6) ; placer au sommet, des clefs et contre-clefs plus épaisses (f_7) ; couper une pile de viaduc en moellons bruts par des assises de libages, faire un mur d'assises superposées de béton, de galets, de moellons, de briques, de pierres de taille.

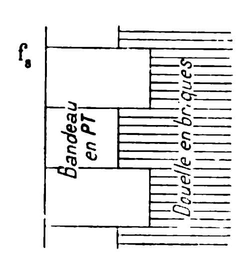


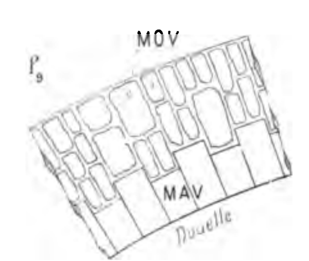


89. — Les Grecs, les Romains posaient sans mortier les pierres de taille : il n'y en a pas au Parthénon, au Pont du Gard.

Art. 2. — Danger de faire autrement. —

Mais il peut être dangereux de changer les matériaux parallèlement à la résultante R ; par exemple dans une voûte surbaissée ou de grande portée, d'avoir des bandeaux de pierre de taille, c'est-à-dire avec peu de joints et des joints minces, et un corps en briques qui en a beaucoup [90] (f_8) ;





ou bien de « queuter » une douelle en pierre de taille ou en moellons d'appareil par des moellons bruts, qui ont plus de joints et des joints plus épais (f_9).

Il y aura tendance à séparation derrière les parties qui tassent moins, c'est-à-dire entre le bandeau et le queutage, entre la douelle et le queutage, entre le bandeau et la douelle [91], tendance à écrasement du bandeau, qui tasse moins [90, 92, 93].

Art. 3. — Règle pratique pour la direction des assises. —

Les assises devraient être normales à la courbe de pression ; on tâchera d'obtenir, par des tracés appropriés de l'intrados et de l'extrados, qu'elle se confonde avec la fibre moyenne.

Mais, si on disposait les assises suivant des plans normaux à la fibre moyenne [94], on aurait des angles aigus à l'intrados.

En pratique, on appareille normalement à l'intrados.

§ 2. — *MATÉRIAUX DES TROIS PARTIES DE LA VOÛTE, BANDEAUX, DOUELLE, QUEUTAGE*

Art. 1. — Bandeaux.

A. - Appareil. — Ils sont toujours en moellons d'appareil ou en pierre de taille ; dans les villes, toujours en pierre de taille, soit de petit échan-

90. — Au pont de Belleperche, sur la Garonne (Ligne de Castelsarrasin à Beaumont), ellipses de 33^m, le corps est en briques, les voussoirs du bandeau en craie tendre de Chancelade (1 pour 3 briques) ; au décintrement, il y en eut de fendus, d'écornés, d'éclatés.

91. — Pont Saint-Jean à Saubusse, - ellipses de 24^m à 1/3.2, - mortier de chaux, bandeaux en PT, douelle en MA, queutage en MOV. Au décintrement de la 2e arche, le 13 mai 1881, 35 jours après clavage, la douelle descendit à la clef de 40^{mm} de plus que les bandeaux, et s'en sépara sur 4^m de part et d'autre du sommet.

Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1885, p. 645 à 659. « *Note sur la construction du Pont Saint-Jean sur l'Adour à Saubusse (Landes)* », M. Trépied, Ingénieur des Ponts-et-Chaussées.

92. — De même la façade en grandes pierres de taille des maisons tend à se séparer des murs intérieurs en briques ; de même, dans un mur en moellons bruts, coupé par une chaîne verticale de pierres de taille, il y a souvent décollement le long de la chaîne.

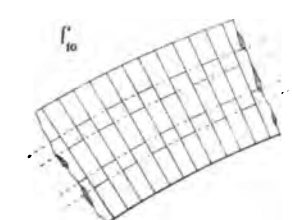
93. — On a souvent revêtu les souterrains avec douelle en moellons d'appareil (MAV) et queutage en moellons bruts lités (MOV), - queutage difficile à bien faire. Nous les faisons maintenant tout en MOV.

94. — On a fait ainsi, un peu à tort, au pont des Amidonniers, pour ne pas avoir d'angles trop aigus à l'extrados aux reins.

tillon, soit de grand, plus monumental, plus difficile à poser et, en général, plus cher.

Dans les voûtes en plein cintre, les bandeaux ont une épaisseur uniforme : on les fait avec les mêmes moellons [95].

Quand ils ne sont pas extradossés parallèlement, la longueur des moellons varie en chaque point. Pour un pont de luxe, on fera diminuer, de façon continue des naissances à la clef, les épaisseurs, hauteurs et queues en douelle des moellons de bandeau ; on règlera les joints suivant des courbes continues bien ajustées à l'intrados et à l'extrados [96, 97, 98].



Aux ponts de Luxembourg [99] et des Amidonniers [100] (f_{10}), l'épaisseur des moellons en douelle est le 1/6 de celle des voûtes.

Ces épures ne laissent pas d'être un peu compliquées.

Aux ponts de Chalonnes et de Nantes, on a, pour figurer de la pierre de taille, groupé les moellons par 4, creusé des refends de deux en deux assises, rejointoyé en creux les grands joints, à plat les joints intermédiaires (f_{11}). Bien qu'en principe il vaille mieux montrer ce qu'on fait, l'effet est bon si l'œil est bien trompé.



On a fait ainsi aux voûtes latérales de Gignac [101].

Quand le bandeau est mouluré, on ne peut pas enchevêtrer les pierres : on a un joint continu sous chaque moulure, à chaque ressaut. Au pont Antoinette [102], au pont de Lavaur [103], il y a ainsi deux rouleaux superposés ; à Luxembourg [104], trois. Les pierres de taille du bandeau ne tiennent au reste que par leurs queues.

95. — APPENDICE : Viaducs.

96. — Aux ponts du Castelet (II, p. 130) de Lavaur (II, p. 135) et Antoinette (II, p. 145), les hauteurs des voussoirs sont définies par des arcs de cercle leur donnant des découpes :

	Castelet	Lavaur	Antoinette
à la clef, de	0m 15	0m 14	0m 14
aux retombées, de	0m 375	0m 17	0m 20

97. — On ne l'a pas fait aux Amidonniers (I, p. 193) : je l'ai un peu regretté.

98. — Au pont de Lavaur (II, p. 135), les moellons d'appareil (MAV) du bandeau ont :

		Naissances	Clef
Épaisseur		0 m 228	0 m 185
Queues en douelle	boutisses	0 m 52	0 m 43
	carreaux	0 m 35	0 m 29

99. — II, p. 67. 100. — I, p. 193. 101. — I, p. 103. 102. — II, p. 145 - f_8.

103. — II, p. 136 - f_{12}. 104. — II, p. 68^iv - f_{11}.

B. — Pierre de taille simulée. — Sur un placage de mortier, on a parfois tracé des joints et simulé du grand appareil à des têtes de voûte en petits moellons irréguliers [105], en béton [106].

Ce n'est pas à conseiller : l'œil n'est pas trompé, et ce gros appareil rapetisse les voûtes [107].

C. - Saillie.

C_1. - En douelle. — La saillie en douelle S_d (f_{12}), trop souvent acceptée, n'a que des inconvénients.

Elle augmente un peu la dépense et impose quelque sujétion dans l'exécution des voûtes.

Elle diminue sans profit l'ouverture utile, dessine une deuxième arête à côté de la seule qu'on doive voir.

C_2. - Sur les tympans. — Mais la saillie S_t (f_{12}) sur le nu du tympan accentue utilement le bandeau, le détache du tympan [108].

Quand l'aspect n'importe pas, pour les ouvrages courants, aqueducs, passages inférieurs, petits viaducs, on la supprimera.

Art. 2. — Douelle (f_{13}).

— Elle doit être tout entière en moellons équarris ou d'appareil, par assises de même queue : la découpe est entre deux assises et non pas entre deux moellons d'une même file [109]. Il y faut tenir la main.

Art. 3. — Queutage.

A. - Faibles pressions. — Alors, on a peu à craindre des inégalités de tassement ; on peut accepter, par économie, un queutage en moellons bruts (MOV) au-dessus d'une douelle ou en arrière de bandeaux en moellons d'appareil (MAV) ou en moellons équarris (MEV), même un corps en béton avec parement en moellons d'appareil.

On a fait en moellons bruts (MOV) à mortier de chaux des queutages de pleins cintres de 35^m [110], d'ellipses de 30^m au 1/4 [111], de 36^m à 1/3,6 [112], de 40^m à 1/3,8 [113] ; encore en MOV, mais à mortier de ciment [114], le pont d'Iguerande

105. — Ponts construits par MM. Liebold : Plauen (III, p. 52), Wengern (III, p. 207), Ziegenhals (III, p. 208), Michelau (III, p. 209), Neuhammer (III, p. 211), Schwusen (III, p. 213), Kupferhammer (III, p. 214), Krappitz (III, p. 265), Gross-Kunzendorf (III, p. 267), Chemnitz (III, p. 129), Göhren (IV. p. 139).

106. — Munderkingen (IV, p. 55), Grasdorf (IV, p. 129), Walnut-Lane (II, p. 83).

107. — Chemnitz (III, p. 129), Göhren (IV, p. 139).

108. — Au pont en béton de l'Avenue Edmondson (I, p. 122), le bandeau et les tympans ne font qu'un ; les voûtes apparaissent comme découpées dans un mur en béton.

109. — On ne « découpera » pas dans une même file, comme on l'a fait à Montanges (III, p. 67).

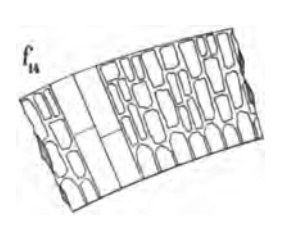
110. — Pont du Sornin (Paray-le-Monial à Lozanne). 111. — Ponts de Chalonnes et de Nantes.
112. — Pont de Marmande. 113. — Fium' Alto (I, p. 110).

114. — Voir le Tableau, p. 10.

sur la Loire[115] (arcs de 28m60 à 1/7,62), le pont d'Arciat sur la Saône[116] (arcs de 31m à 1/7,12), le pont d'Épinay sur la Seine[117] (ellipses de 38m50 à 1/3,08).

Φ_1 — Pont d'Épinay sur la Seine, — 11 avril 1906





Pour réduire le tassement, prévenir ou limiter les fissures dans les voûtes à queutage plus compressible que la douelle, on pourrait les traverser par des chaînes de pierre de taille ou de moellons d'appareil (f_{11}).

B. - Fortes pressions. — Les pressions augmentant, il faut des matériaux de mieux en mieux équarris, de plus en plus résistants, à joints de plus en plus minces, en meilleur mortier. Il faut, surtout, qu'il y ait de moins en moins de différence de tassement entre la douelle, les bandeaux, le queutage, c'est-à-dire que les matériaux soient de plus en plus semblables.

Plus la voûte est hardie, plus il la faut homogène[118, 119].

115, 116. — Épaisseur à la clef $e_0 = \begin{cases} 0^m90 \\ 0^m97 \end{cases}$ Prix du m. c. de « MOV » $\begin{cases} 17^f50 \\ 24^f50 \end{cases}$

117. — Ligne de Saint-Ouen-les-Docks à Ermont.

118. — Voir les Tableaux, p. 8, 9, 10.

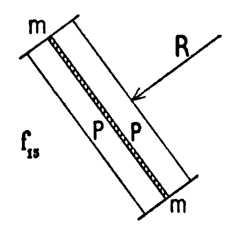
119. — La voûte d'expériences de Souppes (37m881 à 1/17.8) était toute en pierre de taille. (III, p. 375, art. 2).

CHAPITRE V

TRAVAIL

§ 1. — *DISTINGUER ENTRE LES MAÇONNERIES APPAREILLÉES ET LES AUTRES*

Une maçonnerie faite d'assises de pierres P et de lits de mortier *m*, d'épaisseur uniforme, normaux à la pression R, résiste à l'écrasement comme le moins résistant de ses éléments : pierre P, mortier *m* (f_{15}).



Mais une maçonnerie de moellons bruts, qui n'a pas de lits, de joints réguliers, se fissurera, se disloquera, sous une charge très inférieure à celle qui écrase les pierres ou le mortier, charge qui dépendra de la disposition des pierres, de l'adhérence du mortier.

§ 2. — *TRAVAIL DANS QUELQUES VOÛTES APPAREILLÉES*

Les tableaux, p. 8, 9, 10, donnent, pour des voûtes appareillées de 40^{m} et plus, les efforts et la résistance de la pierre.

Les voûtes de 40^{m} (arc de cercle au 1/4) de Maretta et Prarolo[120], ont été construites en 1851-1852 avec des briques s'écrasant en moyenne à 54^{k}74. Au passage de deux trains, la pression atteignait à la clef 12^{k}51, soit les 23/100 de la charge d'écrasement des briques.

L'arche d'essai de Souppes[121] a donné sur la charge de rupture d'une voûte des renseignements très précieux et, jusqu'ici, bien peu mis à profit. C'était un arc de 37^{m}881 de portée, surbaissé à 1/17,8, en pierre de taille de Souppes s'écrasant, en moyenne, à 455^{k}, et mortier de ciment au dosage de 750^{k}, en joints de 12^{mm}. La contre-clef, diminuée au ciseau, tenait encore sous une pression de 399^{k}66 et ne s'est écrasée qu'à 468^{k}57, c'est-à-dire sous la charge même de rupture de la pierre.

§ 3. — *RAPPORT A ACCEPTER DANS LES VOÛTES APPAREILLÉES ENTRE LE TRAVAIL PERMIS ET LA CHARGE D'ÉCRASEMENT*

Art. 1. — Travail des moellons. — Pour les ouvrages métalliques, le rapport du travail permis à la charge de rupture est :

120. — III, p. 93.

121. — Voir III, p. 375, art. 2.

25/100 pour les câbles des ponts suspendus [122] ;

27/100 pour les maîtresses poutres de plus de 30m d'ouverture [123].

Pour le béton armé [124], on admet les 28/100 de la résistance à l'écrasement à 90 jours [125] du même béton non armé.

Or, pour les ponts en pierre, — à l'inverse de ce qui a lieu pour les ponts métalliques et surtout pour les ponts suspendus, — la surcharge roulante est peu de chose à côté de la charge morte. Les efforts sont toujours dans le même sens et varient peu ; il n'y a pas d'effort instantané. Le temps, qui rouille le métal, qui desserre les rivets, durcit le mortier. On y pourrait réserver beaucoup moins de marge à l'imprévu.

Par contre, la répartition des efforts est encore mal connue dans les voûtes inarticulées.

Tout ceci permet de faire travailler les moellons d'une grande voûte, bien assisée, bien exécutée, dans les conditions les plus défavorables de surcharge et de température, au 1/4 de leur charge d'écrasement, — c'est-à-dire beaucoup plus qu'on ne le fait.

Art. 2. — Travail du mortier.

— Bien que les mortiers durcissent avec le temps, on conservera la même limite de travail que pour les moellons, le 1/4 de la résistance à la rupture du mortier en joints minces, soit $0{,}3\,r$ [126], r étant la résistance des briquettes normales ayant l'âge des mortiers au jour prévu pour le décintrement ou pour l'ouverture à la circulation. Par exemple, dans une voûte à décintrer un mois après le clavage, exécutée en mortier de ciment résistant en briquettes d'un mois à 150k, on pourrait accepter une pression maxima au décintrement de 45k [127, 128].

122. — Cahier des Charges joint à la circulaire du 7 mai 1870, art. 4.

123. — Voici les chiffres du règlement du 29 août 1891, art. 2 :

	Fer laminé	Acier laminé
Charge de rupture à l'extension par $\overline{0^m001}^2$ .... ρ =	32k	42k
Limite de travail par $\overline{0^m001}^2$ dans les fermes principales des ouvertures de plus de 30m .... β =	8k5	11k5
Rapport .... $\frac{\beta}{\rho}$ =	27/100	27/100

124. — Instruction du 20 octobre 1906, art. 4.

125. — Mesurée sur des cubes de 0m20.

126. — Voir Chapitre III, § 2, art. 3.

127. — Soit K la résistance à admettre pour la maçonnerie, k_1 celle de la pierre en cubes, k_2 celle du mortier en cubes :
On a employé au Pont de Salcano la formule $K = \frac{1}{3} k_1 + \frac{2}{3} k_2$ (Tome III, p. 144, renvoi 5).

128. — Voici les pressions en Kg/$\overline{0^m01}^2$ admises suivant l'appareil et le mortier dans les voûtes de la ligne du lac de Constance au lac de Zurich * :

Mortier	Composition	Chaux hydraulique : 1vol Sable : 2vol				Ciment : 1vol Sable : 3vol			
	Age en mois	1	2	3	4	1	2	3	4
Moellons	bruts (MOV) (*Bruchstein*)	8k	10k	14k	18k	18k	22k	24k	26k
	équarris (MEV) (*Spitzstein*)	10	13	16	19	23	25	28	30
	d'appareil (MAV) (*Schichtenstein*)	10	14	18	22	26	30	32	35

* *Bodensee-Toggenburg-Zurichsee. Denkschrift über die Eisenbahnverbindung Romanshorn-St-Gallen-Wattwil-Uznach*, p. 79. Zollikoffer-St-Gallen, 1911.

Art. 3. — Travail permis dans une grande voûte en moellons bien équarris et mortier de ciment. — On trouve partout des pierres s'écrasant au-dessus de 400^k, c'est-à-dire pouvant impunément travailler à 100^k par $\overline{0^m01^2}$, charge qu'on n'atteint pas.

C'est alors le mortier qui détermine l'effort permis.

En briquettes, un mortier plastique à 600^k de bon ciment à prise lente par m. c. de sable, porte plus de 200^k à 1 mois, plus de 300^k à 3 mois.

En joints de 10 à 15^{mm}, ce même mortier, bien fait au manège, bien serré au maillet, travaillera impunément à 60^k à 1 mois, à 90^k à 3 mois.

Le mortier empêche d'utiliser toute la résistance de la pierre.

Ce sont donc les joints qu'il faut améliorer : on l'a essayé [129].

§ 4. — *RÉSISTANCE DES VOÛTES A LA TRACTION*

Le mortier adhère aux maçonneries ; c'est par cette adhérence, qui croît avec le temps, que les maçonneries résistent à la traction : si la voûte est mal faite, les matériaux sales, il n'y en a plus.

Dans les très grandes voûtes, les très surbaissées, sous les positions les plus défavorables de la surcharge, aux grands abaissements de température, les calculs indiquent presque toujours des tensions, c'est-à-dire des tendances à fissures. A 1^k, 2^k, il n'y a pas de fissure [130], mais il est prudent de tracer les voûtes pour que la courbe de pression ne sorte jamais du noyau central.

On emploiera le meilleur ciment, celui qui adhère le plus [131].

Le béton de ciment, bien fait, résiste mieux à la traction que la maçonnerie appareillée.

129. — M. Tavernier a construit, en 1906, à la gare d'eau Branla, près de Lyon, un pont à deux arcs jumeaux en pierre de taille, à 3 articulations, de 25^m à $1/10^e$, à joints en zinc coulé.

La résistance du joint en zinc a augmenté avec celle de la pierre.

Annales des Ponts et Chaussées, 1907, volume V, septembre et octobre, p. 6 : « *Pont à arcs de pierre de taille articulés à la clef et aux naissances, avec joints coulés en zinc* ». M. Henri Tavernier, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

130. — Expériences autrichiennes (III, p. 376, art. 4).

131. — Le ciment happe fortement à la meulière de Paris, qui est trouée, rugueuse.

TITRE II

VOÛTES EN BÉTON

§ 1. — *CE QU'ON A FAIT EN BÉTON*

On a fait [1] en béton :

sous route, des buses [2], des passages par-dessus [3, 4], des ponts [5] ;

sous chemin de fer, — lignes d'intérêt local [6] et grandes lignes [7, 8], — des buses [2], de petits ouvrages [8], des moyens [7], des grands [7] ;

des souterrains [9, 10].

1. — Dans leurs aqueducs, leurs thermes, les Romains ont souvent fait le corps des voûtes comme celui des gros murs, par assises horizontales de cailloux et de mortier : ce sont les matériaux du béton, ce n'est pas du béton.
Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », Tome I, p. 521 à 523.

2. — Appendice.

3. — La Cie d'Orléans a construit, de 1873 à 1879, quantité de passages supérieurs en béton soit de chaux, soit de chaux et de ciment, jusqu'à 28^m de portée (Brive à Limoges, 1873-1875 ; Nantes à Châteaubriant, 1875-1878 ; Bergerac au Buisson, 1877-1879,...)

4. — De 1893 à 1901, la Direction des Chemins de fer bavarois a construit 110 passages supérieurs en anse de panier, en béton, de 0^m45 d'épaisseur à la clef, soit de 15^m10 de portée avec tympans pleins, soit de 13^m70 avec tympans traversés par deux voûtes de 5^m.
Nouvelles Annales de la Construction, juin 1901, p. 88, Pl. 23, 24. « *Cintres métalliques mobiles employés en Bavière* ». René Philippe, Ingénieur des Ponts-et-Chaussées.

5. — § 2. Art. 1-*A*, Art. 2-*A*, Art. 3-*A*.

6. — Sur le chemin de fer d'intérêt local de Nurtigen à Neuffen (Wurtemberg), tous les ponts voûtés sont construits en béton :
Le plus grand (portée = 19^m60 ; surbaissement = 1/5,6) s'est bien comporté aux épreuves, sous une locomotive de 29^T.
Zeitschrift des Œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereines, 12 octobre 1900.

7. — § 2. Art. 1-*C*, Art. 2-*B*, Art. 3-*B*.

8. — Sur la ligne de Linarès à Almeria (Espagne), quand on n'avait ni maçons, ni carrière, on a construit en béton (ciment : 450^k, pierre cassée et gravier 2^v, sable 1^v - et souvent, à la place, 3^v du tout venant du lit des torrents sans criblage), quantité d'ouvrages courants jusqu'à 5^m, - souvent sous charge de remblai de 3 à 4^m.

9. — Souterrains :

	Pierre cassée ou gravier	Mortier — Cube	Mortier — Dosage — Sable	Mortier — Dosage — ciment à prise lente
Métropolitain de Paris (pieds-droits et radier)	$0^{mc}8$	$0^{mc}55$	1^{mc}	450^k (laitier)
Mont d'Or (Frasne à Vallorbe, 1910-1913) reins et pieds-droits				
partie courante dans la marne bleue	1^{mc}	$0^{mc}50$	$0^{mc}90$	500^k (Vicat)
là où il y avait des suintements d'eau gypseuse	1^{mc}	$0^{mc}50$	$0^{mc}90$	600^k (Pelloux)
là où il fallait un revêtement imperméable (béton à petits éléments)	$0^{mc}8$ ("gravillon")		$0^{mc}4$ (sable fin)	500^k
Mauvages (Canal de la Marne au Rhin) (4880^m dans une marne bleue se délitant à l'air, - en reconstruction depuis 1910 ; — cerveau de 3^m90 de rayon ; revêtement de 0^m80	1^{m3} (gravier)	$0^{mc}60$	1^{mc}	500^k (laitier)
Col de Tende (1 voie, - Ligne de Nice à Coni)	$0^{mc}8$ (calcaire cassé)		$0^{mc}480$ (quartzite)	250^k
Col de Puymorens (traversée des Pyrénées, ligne d'Ax à Bourg-Madame)	1^{mc} (pierre cassée à 0^m06)	$0^{mc}67$	$0^{mc}80$	500^k
New-York Central. Suivant le terrain	1^{vol} 1^{vol}		2^{vol} 3^{vol}	4^{vol} 6^{vol}

10. — Et aussi des écluses :
Ecluses du Canal de Panama, environ 3,5 millions de m. c. de béton à 1^v, 3^v, 6^v. — Effort maximum : 21^k par $\overline{0^m01}^2$.
Annales des Ponts-et-Chaussées, 1912, mars et avril : « *Le Canal de Panama* », M. Dumas.
Ecluse à la mer, de Emden (Deutsche Bauzeitung, 12 à 23 juillet 1913).
Des formes de radoub : cale sèche Gladstone à Liverpool (Génie Civil, 16 août 1913) ;
Des murs de soutènement.....

Pont	Pays	Date	Voir Tome, page	Voûtes: Nombre	Intrados [11]	Portée	Surbaissement	Béton: Composition en volume: Ciment 1vol — Sable	Pierre cassée ou Gravier	Résistance en Kg/0m01²: 𝔑	à	Pressions en kg/0m01²: Clef MAX.	Clef moy.	Reins MAX.	Reins moy.	Rapport: Pression MAX. dans la voûte / 𝔑	Observations — Sources
Art. 1. — Voûtes inarticulées [12]																	
A. – Sous route.																	
de Kinclaven, sur la Tay	Angleterre	1905	»	6	OE	18m75	1/4.56	1er roul. 3v, 2e roul. 8v									*Engineering*, 12 …
sur le Piney Creek, à Washington	États-Unis	1907	»	1	Â	38.10	1/3.20	2v5	5v p.c.								*Engineering Rec…* 26 janvier 1907 …
de l'Avenue Edmondson, à Baltimore	États-Unis	1908-09	I-122	1	E	42.37	1/3.17	2.5	5 p.c.			»	»	»	»		
de Bellefield, à Pittsburg [13]	États-Unis	1896-97	III-49	1	Â	45.72	1/4.10	2	4.5 p.c.			»	»	»	»		
de l'Avenue du Connecticut [14], à Washington	États-Unis	1904-08	I-67	5	C	45.72	»	2	4.5 p.c.			»	»	»	»		
sur la Moselle à Mehring	Allemagne	1903-04	III 252	4	Â	46	1/7.45	3	5			»	21k3	31k5	18k6		
sur la Moselle à Schweich	Allemagne	1905-06	III 268	3	Â	46	1/7.45	2.5	5			33k8	21.1	32.8	19.3		
sur la Moselle à Trittenheim	Allemagne	1907-08	III 276	3 / 1	Â	46 / 30	1/7.45 / 1/6.71	2.5	5			»	22.5	29.2	21.6		
sur la Moselle à Longuich	Allemagne	1909-11	III 279	1 / 2 / 1	Â	46 / 43 / 34	1/7.45 / 1/8.05 / 1/10	8	gr.			»	»	»	»		
de Guggersbach	Suisse	1903	III-59	1	Â	50.20	1/6.11	Pour 1mc de béton 250k de ciment				22		22.5			
de Walnut-Lane	États-Unis	1906-08	II 83	2	ÂÂ	70.71	1/3.32	2	5 p.c.	331k	1 an	Pression maxima : 26k6				1/12	Gros moellons … suivant le rayo…
sur la Rocky River	États-Unis	1908-10	II 95	2	ÂÂ	85.34	1/3.46	2	4 p.c.	145k / 223k	30 j. / 6 mois	44.1	37.1	39.8	32.3	1/5.6	Gros moellons … suivant le rayo…
B. – Sous conduite d'eau.																	
sur la Sosa (Canal d'Aragon)	Espagne	1904	»	5	E	15	1/3	Ciment 225k Sable 500l	Gr. 880l	140k	28 j.	Pression maxima : 14k				1/10	*Revista de Obras P…* 27 octobre 1904.
de Pont-sur-Yonne	France	1870-73	I-213	1 / 3 / 2	E / E / E	40 / 30 / 22.60	1/5	chaux 0mc250 ciment 0mc125				»	»	»	»		
de Weisenbach	Allemagne	1885	III-219	1	Â	40	1/8	2.5	5			20		25			
C. – Sous chemin de fer à voie normale.																	
de Cheltenham, sur la Rivière des Pères (*Ch. de fer St-Louis-San Francisco*)	États-Unis		»	4	C	9.52	»	6									*Engineering Ne…* 1904. — Moins … qu'en béton ar…
de Cannington [14]	Angleterre		»	10	E	15.24		6									Id., 2 nov. 1905.
de Glenfinnan (*West Highland Ry*)	États-Unis	1897-98	»	21	C	15.24	»	4 sable et pierre sortant du concasseur									*Minutes of Proc… the Am. Soc. C…* p. 304.
de Northampton (New Jersey) (*Central Railroad — 3 voies*)	États-Unis		»	1 / 1		15.78 / 10.36											Pont biais — 1/… en 3 mois 1/2.
de Lindenwood, sur la Rivière des Pères (*Ch. de fer St-Louis-San Francisco*)	États-Unis		»	3	C	16.33	»										*Engineering Ne…* 1904. — Moins … qu'en béton ar…
de Lauscha (Viaduc : hautr 40m)	Allemagne	1912	»	6	C	20	»	2	4 p.c.	225k		Pression maxima : 16k					*Beton und Eisen…* … vier 1913.
de Galveston (*une chaussée et 3 voies*)	États-Unis	»	»	28	A	21											*Engineering Rec…* 27 mai 1911.
sous la gare de Rangier	Allemagne	1906-08	»	1	E	21.06											Dr von Emperger… *buch für Eisen…* Vol. VI, p. 31…
d'Ashtabula (Ohio) (*Lake Shore Ry — 4 voies*)	États-Unis	1904	»	2	C	22.56	»										*Railroad Gazett…* … vier 1905.
de Berne (*Ch. de fer de Gürbethal*)	Suisse	1901	»	1	Â	23.40	1/3.9										Coût 15250f - En … *Schweizerische Ba…* 14 déc. 1901.
sur le Deep Creek, près de Degilbo	Angleterre	1905	»	1	Â	24.38	1/2.85	3	6 p.c.	180k	3 mois						*Engineering*, 27 … Moins cher qu'… armé.
de Bellefield Avenue, à Philadelphie	États-Unis	1909-10	»	1	Â	24.38	1/4.72	»	»								*Engineering Rec…* 20 août 1910.
de Riverside (Californie) (*Los Angeles and Salt Lake Ry*)	États-Unis	1902-03	»	8	C	26.21	»	2	4.5 p.c.								*Engineering Rec…* 9 septembre 19…
de Borrodale (*West Highland Ry*)	États-Unis	1897-98	»	1	Â	38.73	1/5.54	4 sable et pierre sortant du concasseur									*Minutes of Proc… the Am. Soc. C…* p. 304.
sur la Big Muddy River	États-Unis	1901-03	I-225	3	E	42.67	1/4.67	2	5			47.7	23.9	13	10.3		

Art. 2. — Voûtes semi-articulées.

A. – Sous route.

Pont	Pays	Date	Voir Tome, page	Nombre	Portée totale	Portée entre rotules	Surbaissement	Sable	Pierre cassée ou Gravier	𝔑	à	Clef MAX.	Clef moy.	Reins MAX.	Reins moy.	Rapport	Observations — Sources
d'Ehingen, sur le Danube	Allemagne	1897-98	IV 260	2 / 1	21 / 20			2.5	5								
d'Ehingen (Passage supér')	Allemagne	1891	IV 260	1	23	18	1/5	2	6			9k2		14k6			
de Rechtenstein	Allemagne	1892	IV 260	2	23	23	1/9.2					17		18			+ 1/8 de pierre…
de Mühlheim	Allemagne	1895	IV 260	»	29.20	22	1/10	2.5	5								
sur le Lein	Allemagne	1895	IV 260		29.60	23.10	1/6.6	2.5	5								
de Gemmrigheim	Allemagne	1895-96	IV 260	4	38	38	1/6.9					Pression maxima : 36k					
de la Coulouvrenière	Suisse	1895-96	IV 81	2	40	40	1/7.41	Pour 1mc de béton Ciment 425k Sable 5 = Gravier 8		295k	28 j.	30	»	»	»	1/9.8	
de Munderkingen	Allemagne	1893	IV 55	1	59	50	1/10	2.5	5 gr.	254k	28 j.	35.3	»	39.2	»	1/6.6	
B. – Sous chemin de fer à voie normale.																	
sur la Cecina	Italie	1910-12	IV-264	3	30	30	1/8.82	Ciment 350k Sable 0m5	gr. 0m8	230k	28 j.						

11. — Pour le sens des symboles, voir Préliminaires, p. 3. 12. — Voir aussi, Tome III, p. 283 et suivantes. 13. — Bandeaux et douelle en pierre de taille. 14. — Bandeaux en béton…

Pont	Pays	Date	Voir Tome IV, page	Voûtes: Nombre	Portée entre appuis	Entre rotules: Portée	Entre rotules: Surbaissement	Béton: Composition en volume: Ciment 1 vol: Sable	Pierre cassée ou Gravier	Résistance en Kg/0m01²: R	à	Pressions en kg/0m01²: Clef MAX.	Clef moy.	Reins MAX.	Reins moy.	Rapport: Pression MAX. dans la voûte / R	Observations / Sources
Art. 3. — Voûtes articulées.																	
A. – Sous route.																	
'Altwasser, à Neubourg [15]	Allemagne	1907-08	261	3	23m72	22m	1/8.3 et 1/9.3	»	»								
e Hillesheim		»	»	1	24.60	»	»										Dr von Emperger. Handbuch für Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 340.
e Halden		1904	261, 266	1 2	» »	25 18.50	1/9.09 1/10	4r	6r	172k	28 j.	Pression maxim. 25k6 / 24k2					
e Hagen		»	»	1	25.50	»	1/7.28	»	»								Id., p. 341.
e Eitorf, sur la Sieg		1907	»	1 2	28 25	» »	1/9.3 »	» »	» »								Id., p. 340.
le Brookside Park, à Cleveland	États-Unis	1906	269	1	28.04	26.33	1/16.5	2.5	5								
entre Ulm et Neu-Ulm	Allemagne	1911-12	261	1 2	» »	28.50 27	1/7.05 1/7.5										
l'Ilmnau		1896	266	1	»	30	1/10	2.5	5			Pression maxima : 35k					
le Tarvis, sur la Schlitza (2 ponts)	Autriche	1902	264	1	30	30.40	1/9.8	2	3								
le Forst, sur l'Etsch		1903	264	1	30	30.40	1/9.8	2.5	4								
le Dusseldorf	Allemagne	1902	266	1	30.13	28.02	1/14.6	4	4	278k	6 mois						
le Hauconcourt		»	266	5	33	33	1/7.67	3	4.5								
le Burzweiler	Alsace	1897	269	1	34.20	34	1/8.39	3	4.5								
le Port-de-Bouc [15 bis] — Passages supérieurs	France	1912-13	»	1	25.60	25.60	1/6.56	Ciment 750k, sable 1m3, pierre cassée 2m3		»	»	Pression maxima 35k					
le Martigues — Miramas, L'Estaque		1913-14	»	1	36.30	36.30	1/9.2			»	»	Pression maxima 38k2					
le Sauvage	Allemagne	1906-07	266	1 2 1	36 34 30	36 34 30	1/7.04 1/7.5, 1/8.3 1/7.75	2.5	5			Pression maxima : 28k6					
le Staffel, sur la Lahn		1904	»	1	37.10	»	1/6.4	»	»								Dr von Emperger. Handbuch für Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 662.
le Dennhausen		1909-10	266	3	38	36	1/8.9 1/9.4	3.5	3.5								
l'Ile Stvanice, sur la Moldau à Prague	Bohême	1911	»	1 2	39 36	» »	1/5.86 1/5.52	4	p.c.	606k	28 j.						Génie Civil, 5 oct. 1912.
le Britz, sur le Canal de Teltow, près de Berlin	Allemagne	1904-05	266	1	39	36.42	1/7.5	5 4	6.5 4								Biais à 69°.
le Stauffacher, à Zurich	Suisse	1899	»	1	39	39.60	1/10.7	»	»								
Frédéric-Auguste, à Dresde		1907-10	266	2 4	39.30 36.15 à 28.33	34.10 »	1/6.9	» »	» »								
le Tübingen		1901	»	1 1	39.40 36.23	»	1/11.2 1/12.1	»	»								Dr von Emperger. Handbuch für Eisenbetonbau, Vol. VI, p. 662.
le Hochberg	Allemagne	1901-03	177	2	39.40	40	1/7.41	2.5	5 p.c.			28		34			
le Grasdorf		1899-1900	129	1	40	40.39	1/8.93	2.5	4 p.c.	228k	96 j.	Pression maxima : 37k				1/6	
le Malling		1899-1901	175	3	40	40.50	1/8.56	3	6 p.c.			»	»	»	»		
le Neckargartach		1903-05	186	5	40	40	1/8 à 1/10	2.5	4.5			Pression maxima : 38k					Gravier 1r5, Pierre cassée 3r } 4r5
le Reichenbach [15]		1902-03	183	1 1	44 28	41	1/10					27	»	26	»		
le Wittelsbach [15]		1904-05	199	1 1	27 26			2.5	5 gr.			29	27	28	26		Arche de 44m de Wittelsbach.
le Moulins-lez-Metz [15]		1904-05	202	1 2	44 40	44.70 40.54	1/7.75 1/8.37					25 24		31 32	15 18		
Elise [14]		1905-07	151	1	47.50	43.50	1/9.89	2.3	4.7			27	»	35.7	»		Gravier 4r, Pierre cassée 0r5 } 4r5
l'Inzigkofen		1895	225	1	47.90	43	1/9.81	2.5	4.5	181k	160 j.	43.9		37.7		1/5	
le Gräveneck		1911-12	213	1	48	48.42	1/6.25	2	5 p.c.			23.2		33.6			
le Neckarhausen		1899-1900	232	1	59.40	50	1/11	2.5	5 p.c.			Pression maxima : 39k8					
le Mannheim [15]		1905-08	205	2	59.50	58.50	1/10.6	4	3 p.c.			37	27	35	31		
le la Wallstrasse, à Ulm		1904-05	143	1	65.45	57	1/9.83	3	5 p.c.	346k	57 j.	Pression maxima : 40k				1/8.6	
B. – Sous chemin de fer à voie normale [16].																	
le Rothenburg	Allemagne	1907	266	5	30	30.50	1/7.26	5									
le Dresde		1894-96	266	5	31.35	»	»	5 5	6.75 5								
Chemnitz		1898-1900	107	1 4 6	43.10 27.90 26.65	» » »	» » »	4 5	4.5 p.c. 6.5	253k 208k	3 mois	Pression maxim. admise 28k5 / 25k					
Garching		1905-08	95	1 1 1	44.35 33.95 33.89	38.55	1/3.32 1/2.58 1/2.65			305k	69 j.	Pression maxima : 26k				1/11.7	Gravier 2r5, Pierre cassée 2r5 } 5r
Illerbeuren		1903-04	159	1	59	57.16	1/5.82	2.5	5 p.c.	240k	28 j.	Pression maxima : 31k				1/7.7	
Kempten (3 ponts)		1905	115	1 2 6 2	64.50 63.80 21.60 20.60	50.60	1/5.52		p.c.	291k	28 j.	Pression maxima : 35k				1/8.3	


15. — Bandeaux en pierre. 15 bis. — Voir renvoi 50, p. 62. 16. — Voir aussi, Tome IV, p. 249 et suivantes.



Art. 1. — Éléments.

A. - ***Ciment.*** — On choisit pour les voûtes le meilleur ciment.

B. - ***Sable.*** — Sable naturel, - sable de pierres broyées [17, 18].

C. - ***Pierre cassée ou gravier.*** — On a employé le plus souvent de la pierre cassée; on l'a parfois mélangée de gravier [19].

D. - ***Matériaux lavés.*** — En général, on lave les matériaux [20].

Art. 2. — Dosage [21]. —

En Allemagne, aux États-Unis, où l'on a fait beaucoup de voûtes en béton, les dosages les plus employés sont :

		Ciment	Sable	Pierre cassée, ou Gravier, ou mélange des deux
Voûtes	Volumes	1	2.5	5
	soit, pour 1^{mc} de sable	$0^{mc}4$	»	2^{mc}
Culées	Volumes	1	3	6
	soit, pour 1^{mc} de sable	$0^{mc}33$	»	2^{mc}

Certains cahiers des charges imposent seulement la résistance que doit avoir le béton, à charge pour l'entrepreneur de trouver le dosage.

Art. 3. — Pierres dans le béton. —

Pour diminuer le cube du béton, peut-être pour en augmenter la résistance, on y a noyé de grosses pierres :

en fondation [22];

dans de grandes voûtes [23].

On y emploie le béton comme du mortier entre de grosses pierres plates posées dans le sens du rayon [24].

§ 4. — *EFFORTS. — RÉSISTANCE IMPOSÉE*

Dans les grandes voûtes, on fait travailler couramment le béton de 30^k à 40^k [25, 26].

17. — Neckarhausen (IV, p. 232). Voir les essais de M. von Bach à Stuttgart, p. 235. — Wallstrasse (IV, p. 143), mortier de parement.

18. — Voir p. 12, Art. 1.

19. — Voir tableau p. 25, dernière colonne.

20. — Aux essais faits pour le pont de Neckarhausen (IV, p. 232), les matériaux lavés et non lavés ont donné les mêmes résistances.

21. — Sur la ligne de Miramas à L'Estaque, on a construit, en 1911-14, deux passages supérieurs en béton, articulés, de 25^m60 (Φ_{11}, p. 62) et 36^m30 de portée, au dosage : ciment 750^k, sable 1^{mc}, pierre cassée 2^{mc}.

22. — Höfen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Inzigkofen (IV, p. 225), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202), Edmondson (I, p. 122), Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

23. — Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

24. — On a construit en béton de ciment et gros blocs noyés les barrages de :

Barossa, près de la ville de Gower (Australie), 29^m de hauteur. (Engineering News, 7 avril 1904, p. 321);

la Shoshone River (Montagnes Rocheuses, - Etat de Wyoming), hauteur 100^m au-dessus de la fondation, 75^m au-dessus du lit, — béton à 1^v, 2^v, 5^v, avec 25 % environ de blocs de 10 à 100^k, 0^m15 au moins de béton entre eux (Engineering Record, 23 juillet 1910, p. 88).

25. — Voir § 2.

26. — Une voûte d'épreuve faite en Wurtemberg a donné, au bout de 2 ans et 8 mois, une résistance de 520^k par $\overline{0^m01}^2$.

Centralblatt der Bauverwaltung, 26 oct. 1901.

§ 5. — *MODE D'EXÉCUTION DES GRANDES VOÛTES EN BÉTON*

Art. 1. — Béton damé. — Sauf les premières (celles de Pont-sur-Yonne[27], qu'on reconstruisit trois fois), toutes les grandes voûtes en béton sont construites par tranches entre cloisons normales à l'intrados ou plutôt à la fibre moyenne, et sur toute l'épaisseur à la fois[28]. Dans chaque tranche, le béton est pilonné par couches horizontales.

On maintient humide la surface du béton posé le soir : au besoin, on la nettoie et on y applique du mortier.

Pour avoir encore une meilleure liaison, on y ménage quelquefois des rainures[29].

Art. 2. — Béton moulé. — On a parfois employé des voussoirs de béton moulé d'avance (pierre de taille artificielle)[30] :

soit pour la douelle et le queutage[31] ;
soit pour la douelle seulement[31 bis] ;
soit pour les bandeaux seulement[32].

Art. 3. — Voûte partie en béton, partie en pierre de taille. — On fait, quelquefois, le corps seulement en béton et les bandeaux en pierre de taille[33] ; ou les bandeaux et la douelle en pierre de taille, le reste en béton[34].

Art. 4. — Parements. — On a renoncé aux enduits ; ils adhèrent mal. On fait les parements en même temps que le corps, mais en béton plus fin, qu'on dresse ensuite au ciseau ou qu'on lave quelquefois à l'acide chlorhydrique pour lui donner l'aspect de la pierre[35].

On a employé des ciments colorés[35, 36], des sables de couleur[37].

Art. 5. — Protection contre la gelée. — Quand il a fallu bétonner par le froid, on a ajouté à l'eau du mortier, du sel dénaturé[38], du carbonate de soude[39].

27. — I, p. 213.

28. — Sauf les voûtes de Guggersbach (III, p. 59) et de Kinclaven (V, p. 24), construites en deux rouleaux.

29. — Big Muddy (I, p. 225), — Avenue du Connecticut (I, p. 67).

30. — On a revêtu sur 0m25 la calotte du souterrain de Montrichard (Ligne de Vierzon à Tours) en briques de béton de ciment comprimé (300k de ciment de Portland par m. c. de sable à gros grains).

Au souterrain de Puech Mergou (ligne d'Albi à Saint-Affrique), 960m de longueur, sur 920m dans le schiste compact, on a revêtu la calotte, sur 0m25, en briques de ciment : ciment 300k, gravillon 1mc.

Dans son Rapport sur les souterrains des Alpes, au Congrès de Berne en 1910, M. Hennings conseille l'emploi des voussoirs en béton, même pour les fortes pressions : alors, les armer.

Au deuxième souterrain du Simplon, on emploie des pierres artificielles de 35c × 17c × 7c4 ainsi composées : 5 % de ciment Portland. 15 % de chaux, 85 % de sable siliceux. On les chauffe sous pression de 6at ; elles portent 400 à 600k par $\overline{0^m01}^2$.

Au souterrain de Puymorens (traversée des Pyrénées, ligne d'Ax à Bourg-Madame), on a prévu ce dosage : ciment à prise lente, 300k ; sable, 400 litres ; pierre cassée à l'anneau de 0m04, 800 litres.

31. — Wiesen (I, p. 235). 31bis. — Viaduc des Torrents, à Finhaut (Ligne de Martigny au Chatelard), Portée 35m40, Surbaissement 1/3.64. Ciment Portland, 400k ; sable 450l ; pierre cassée à 0m04, 900l.

32. — Avenue du Connecticut (I, p. 67), — Cannington (§ 2, Art. 1, C_1).

33. — Reichenbach (IV, p. 183), Wittelsbach (IV. p. 199), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202), Mannheim (IV, p. 206), Elise (IV, p. 151).

34. — Bellefield (III, p. 49). 35. — Grasdorf (IV, p. 129). 36. — Munderkingen (IV, p. 55), Inzigkofen (IV, p. 225). 37. — Wallstrasse (IV, p. 143).

38. — A 7 % pas d'accident par − 14° (Œsterreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 1er novembre 1902, p. 777. « *Über Betonbauten auf der Salzkammergutbahn* », M. Karl Muck, Ingénieur.

On a proposé aussi le chlorure de calcium qui abaisse davantage le point de congélation et rendrait le mortier plus étanche.

39. — Voir, pour l'emploi du carbonate, p. 14, Art. 7-A.



Art. 1. — Avantages. — Le béton est économique, lorsqu'on a, à proximité, du ciment, du sable, du gravier[40, 41] ; ou quand il est difficile de trouver des moellons[42] ou des maçons.

Il dispense des sujétions d'appareil dans les ponts biais[43].

Il est fait par des machines, et est vite fait.

Chaque jour, les bons maçons se font plus rares ; malgré qu'on en ait, on construit de plus en plus en béton, que mettent en place de simples manœuvres[44, 45], bientôt des machines[46]. Aussi, l'emploie-t-on beaucoup aux États-Unis[47].

Il est moins lourd que la maçonnerie et pèse moins sur le sol[48].

Art. 2. — Inconvénients.

A. - Perméabilité. — Si l'eau traverse une voûte appareillée, elle n'y peut appauvrir en mortier que les joints : il n'y a du mortier que là.

Si elle traverse le béton, où le mortier est partout, elle attaque tout.

On devra donc, encore plus que pour les voûtes en moellons, mettre à l'abri de l'eau les voûtes en béton.

Le béton est très perméable[49]. On a fait beaucoup d'essais pour le rendre étanche : on n'y a pas encore réussi[50].

Le mieux est de forcer le dosage et de n'y mettre que de petites pierres. Le béton riche et à petits éléments se laisse moins traverser.

B. - Fissures. — Il faut au béton des formes pleines, arrondies[51] : pas de rentrants, pas de changements brusques de formes.

S'il y en a, comme aux retombées des arcs très surbaissés, il faut l'articuler. Autrement, il y aura, non pas des ouvertures localisées de joints comme dans les voûtes appareillées, mais des fissures irrégulières, irréparables.

C. - Vilain aspect. — Jusqu'ici, il demeure désagréable d'aspect : grandes surfaces ennuyeuses, tachées. On ne sait encore qu'y dessiner des moulures, de faux joints.

40. — Munderkingen (IV, p. 55), Inzigkofen (IV, p. 225), Grasdorf (IV, p. 129), Illerbeuren (IV, p. 159).

41. — On se contente parfois de mélanger le ciment à ce qui sort du concasseur : le fin est le sable (Ponts de Glenfinnan, 21^m, Borrodale, 38^{m}73, — § 2, Art. 1-C_1).

42. — Wiesen (I, p. 235).

43. — Munderkingen (IV, p. 55), Élise (IV, p. 151), Pont-sur-Yonne (I, p. 213), Ponts de l'Ile Stvanice à Prague, de Britz, près de Berlin (p. 25),.....

44. — Big Muddy (I, p. 225).

45. — On le préfère pour remplir les chambres de travail à l'air comprimé, où les maçons ne travaillent pas volontiers.

46. — On commence à le pilonner mécaniquement.

47. — On y voit concasser de beau granit pour faire des pierres en béton moulé.

48. — Dans les culées qui résistent par leur poids, il faut de plus grandes épaisseurs.

49. — Le capitaine américain Taylor a constaté des suintements à travers plus de 9^m de béton. (Revue du Génie, juillet 1903).

50. — On a enduit la surface d'huile. On a mélangé, au moment du gâchage, du pétrole, du savon noir,...

Jusqu'ici, les bétons imperméabilisés ne résistent qu'aux faibles pressions d'eau. Sous les fortes, ils sont plus perméables que d'autres. Le mieux paraît être de forcer le dosage et de badigeonner de goudron.

Au Canal de la Marne à la Saône, le béton de gravier, avec des grains de 0^{m}02 au plus, bien comprimé, a été « remarquablement étanche ».

Génie Civil, 10 octobre 1908, p. 396 à 400. « *Le Canal de la Marne à la Saône* ». M. Jacquinot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

51. — Il est très bien employé dans un phare (Phare de Raz-Tina, Tunisie).

Annales des Ponts et Chaussées, 1897, 1er trimestre, p. 252, M. Regnoul.

TITRE III

FRUIT DES TÊTES

§ 1. — *CE QUI A ÉTÉ FAIT*

Art. 1. — Petits ouvrages. — Pas de fruit[1].

Art. 2. — Viaducs. — Voir à l'Appendice.

Art. 3. — Ponts bas à voûtes de moins de 40^m. tous ont des tympans verticaux.

Art. 4. — Voûtes de 40^m et plus. — Sur 153 ouvr tant des voûtes de 40^m et plus, 101 n'ont pas de fruit, dont tous l route inarticulés, à un seul anneau :

52 sont à fruit : les voici

Fruits	Voie[2] portée	Ponts de :[2] *Les voûtes articulées so*
1/45=0,022	Fr	*Kempten*, $\widehat{A}^1$, IV, p. 115.
1/40=0,025	1te	Luxembourg, Walnut-Lane, Rocky River, Constantine, $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$, 107. Amidonniers E^n E^n, I, p. 193.
	Fr	Céret, Escot, $\widehat{A}^1$, II, p. 160 et 174 ; Krummenau $\widehat{A}^1$, III, p. 164 *(Tympans 1/50).*
	fr	Solis C^1, I, p. 55 ; Wiesen, E^1_h, I, p. 235 ; Cinuskel, Tuoi, $\widehat{A}^1$, II
1/36=0,026	Fr	Ballochmyle C^1, I, p. 41.
1/33=0,030	Fr	Pouch, Freyssinet $\widehat{A}^1$, III, p. 110 et 112.
1/30=0,033	Fr	Castelet $\widehat{A}^1$, II, p. 130 ; Gutach, Schwändeholzdobel, Langei p. 122, 126 et 152 ; *Garching* E^n, IV, p. 95.
1/25=0,04	Fr	Lavaur, Antoinette, $\widehat{A}^1$, II, p. 135 et 145.
1/20=0,05	r^{te}	*Wallstrasse* $\bar{A}^1$, IV, p. 143.
	Fr	$\widehat{A}^1$, II : Wäldlitobel, p. 157 ; Palmgraben, p. 164 ; Schalchgrabe weinbach, p. 171. $\widehat{A}^1$, III : Maretta, Prarolo, p. 93 ; Gour-Noir, p. 103 ; Jaremcze p. 118 ; Worochta, p, 120 ; Diveria, p. 130 ; Strandeelven, p. ben, p. 134 ; Steyrling, p. 137 ; Salcano, p. 141 ; Svenkerud, p. 159. Canale $\widehat{A}^n$, III, p. 185 ; *Morbegno*, $\bar{A}^1$, IV, p. 65 ; *Illerbeuren*, *l*
1/10=0,10	r^{te}	*Hochberg*, *Neckargartach*, $\bar{A}^n$, IV, p. 177 et 186.
	Fr	Chemnitz $\bar{A}^1$, III, p. 129.
Fruit courbe	r^{te}	$\bar{A}^1$, IV : *Inzigkofen*, p. 225 ; *Neckarhausen*, p. 232 ; *Max-Josep*

La première grande voûte à fruit, celle de Ballochmyle[3], est de

1. — Appendice : Ouvrages de 8^m et au-dessous.
2. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.
3. — I, p. 41.

Le fruit augmente les sujétions d'appareil et la dépense, mais allonge les joints des reins et y réduit le travail.

Il augmente la résistance aux efforts transversaux (vent, force centrifuge).

Il est souvent utile, quelquefois nécessaire, dans les ponts en courbe [4].

Mais, surtout, il fait bien.

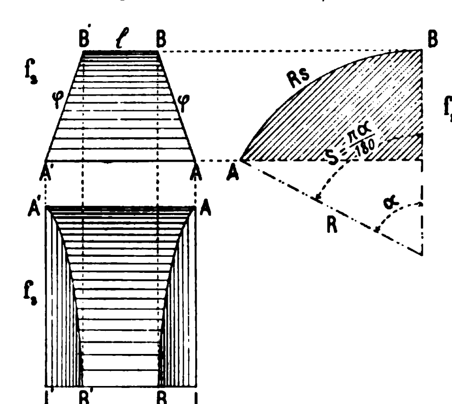
De plus, si on se place sous la voûte, près d'une retombée, l'effet des fruits s'ajoute à celui de la perspective : l'ouvrage paraît plus grand.

Au-dessus de piles à fruit, on se gardera de placer des tympans verticaux : ils paraîtraient en surplomb [4].

Il ne faut pas exagérer le fruit : 1/40 suffit [5].

4. — APPENDICE : Viaducs.

5. — Dans une voûte en arc de cercle de rayon R, en fruit φ, les courbes de tête d'intrados sont des arcs d'ellipse surhaussée de 1/2 axes R et $R\sqrt{1+\varphi^2}$.



Soient :

l la longueur de la génératrice de clef ;

α l'angle au centre de l'arc AB ;

s sa longueur sur la circonférence de rayon 1.

La surface de douelle D entre la clef et une retombée est :

$$D = Rs\,[l + 2\,R\,\varphi] - 2\,R^2\,\varphi\,\sin\alpha$$

Le volume du vide A B I A' B' I' (f_3) est :

$$V = R^2\left[s - \frac{\sin 2\alpha}{2}\right]\left(\frac{l}{2} + R\,\varphi\right) - \frac{2}{3}\varphi\,R^3\,\sin^3\alpha$$

TITRE IV

PILES

CHAPITRE I. — DIMENSIONS ET DISPOSITIONS

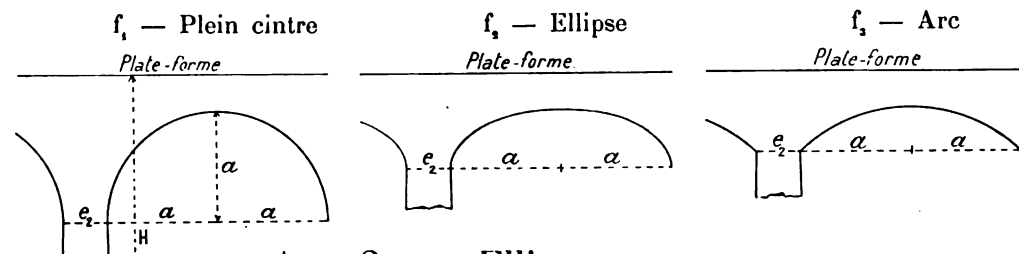
§ 1. — *ÉPAISSEUR DES PILES AUX NAISSANCES DES VOÛTES*

Art. 1. — Pleins cintres (f_1). — Pour un premier essai, — et même mieux, — on peut accepter la formule empirique :

$$e_2 = \frac{2a}{10} + 0{,}04\ H$$

quel que soit H, c'est-à-dire pour les pleins cintres bas [1], comme pour les très hauts viaducs [2].

Pour les ponts bas, $\frac{e_2}{2a}$ est au moins 1/8.



Art. 2. — Ellipses (f_2). — Ce sont toujours des ouvrages bas.

Pour les surbaissements usuels, 1/3 à 1/5, même entre deux arches un peu inégales, on peut encore accepter $\frac{e_2}{2a} = \frac{1}{8}$ [3,4], et même moins, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{10}$ [5].

Avant Perronet [6], on prenait $\frac{e_2}{2a}$ = 1/5 et même plus [7] : à Neuilly, $\frac{e_2}{2a}$ est réduit à 1/9,2.

Art. 3. — Arcs (f_3). — Ce sont aussi des ouvrages bas.

On prend $\frac{e_2}{2a}$ de 1/8 à 1/10 [8] pour des piles entre deux voûtes de portées et montées (et par conséquent de poussées) égales, — et même un peu différentes.

1. — Au pont de Nogent-sur-Marne (I, p. 79) : $e_2 = 6^m$; $2a = 50^m$; $H = 28^m$: $\frac{e_2}{2a} = 0{,}12$. La formule donne 0,1224.

Au pont de St Waast sur l'Agoût (ligne de Montauban à Castres) : $2a = H$; $e_2 = 3^m$; $2a = 20^m$; $\frac{e_2}{2a} = 0{,}15$. L'effet est bon. La formule donne 0,14.

2. — APPENDICE : Viaducs. — Pour $2a = 0{,}40$ H, rapport conseillé, $e_2 = 0{,}2\ (2a)$ épaisseur courante aux naissances des piles à mortier de chaux.

3. — Pont au Change (1/4,5) ; ponts de Port-Ste Marie (1/3,2), Marmande (1/3,6), Saubusse (1/3),....

4. — Ponts : de l'Alma (arche centrale de 43^m au 1/5 entre 2 de 38^m50) (I, p. 153) ; des Amidonniers, entre l'arche de 46^m et celles de 42^m, — entre celles de 42^m et de 38^m50 (I, p. 193).

5. — Au pont de Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), la pile a 4^m entre 2 arches de 41^m et 38^m50.

6. — Les Ingénieurs romains, ceux du Moyen âge, réglaient souvent les piles de façon à résister à la poussée d'une arche : on pouvait ainsi construire les voûtes l'une après l'autre.

Choisy. — *Histoire de l'Architecture*, I, p. 583, - II, p. 563.

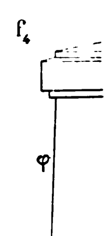
7. — A la fin du XVIIIe siècle, Bélidor conseille pour les grandes voûtes : en plein cintre, le 1/6e ; en anse de panier, le 1/5e.

Architecture hydraulique, seconde partie, Tome II, p. 443, - Paris, Firmin-Didot, M.DCC.LXXXX.

8.

$\frac{e_2}{2a}$	Ponts	Dates	Portée $2a$	Surbaissement	$\frac{e_2}{2a}$	Ponts	Dates	Portée $2a$	Surbaissement
1/8.2	de la Rouvière, sur le Lot (*Mende-*	1878-82	21^m	1/7.21	1/9.5	d'Iguerande, sur la Loire (Saône-	1895	28^m60	1/7.62
1/8.4	de la Farelle, id. (*Séverac*)	1879-82	26	1/8.28	1/9.7	d'Arciat, sur la Saône (et-Loire)	1906	31	1/7.1
1/8.6	National, à Paris.	1852-53	34.50	1/7.5		Corneille, à Rouen.	1810-35	31	1/7.54
1/9	de St Loup, sur l'Allier (*La Ferté-Hauterive-Gannat*).	1910-13	33	1/7.5	1/10	Boucicaut (III, p. 243).	1888-90	40	1/8
					1/10.4	d'Austerlitz, à Paris.	1854	32.30	1/6.8[illegible]
1/9.3	de Roanne, sur la Loire.	1858	28	1/8	1/11.8	d'Orléans (III, p. 255).	1904-06	43.85	1/7.[illegible]

§ 2. — *FRUIT TRANSVERSAL DES PILES*



Un parement vertical est sec et dur [9].

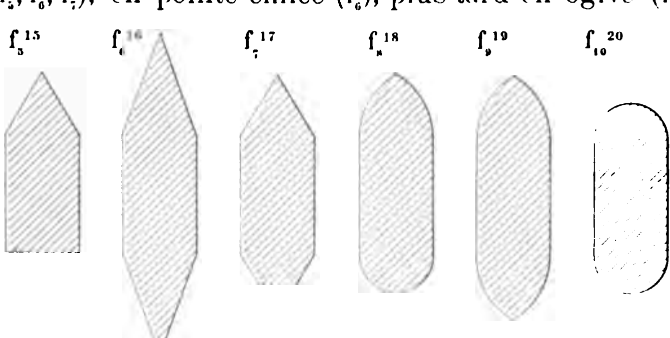
On donnera un fruit de 1/30 à 1/20, soit $3^{cm}3$ à 5^{cm} [10].

Dans quelques ponts de ville, on a dressé en courbe les pieds-droits [11], soit pour continuer l'ellipse d'intrados [12], soit même sous des travées métalliques [13].

Les fruits courbes s'imposent pour les très hauts viaducs [14].

§ 3. — *BECS*

Art. 1. — Tracé en plan. — On a fait des avant-becs en pointe (f_5, f_6, f_7), en pointe effilée (f_6), plus tard en ogive (f_8, f_9), en demi-cercle (f_{10}) ; des arrière-becs carrés (f_5), en pointe, en pointe effilée (f_6), en trapèze (f_7), en ogive (f_9), en demi-cercle (f_8, f_{10}).



Aujourd'hui, on fait trop de becs circulaires (f_{10}) : c'est monotone.

9. — Ponts romains de Salamanque, de Ségovie, d'Alcantara sur le Tage,...

10. — 5^{cm} aux ponts de Montlouis, de Marmande, aux ponts sur la Seine de la ligne de Mantes à Argenteuil : 4^{cm} à ceux de Chalonnes, de St Waast, $3^{cm}5$ au pont d'Arciat (Saône-et-Loire).

11. — Pont de Digoin, sur la Loire (Saône-et-Loire).

12. — Ponts de Bercy, à Paris ; de l'Empereur-François (I, p. 168) ; Edouard VII (I, p. 182) ; des Amidonniers (I, p. 193).

13. — Pont du Métropolitain à Passy.

14. — APPENDICE. - Viaducs.

15. — Ponts romains : Rimini, Salamanque, Fabricius, Milvius, St Ange,....
Espalion (Xe siècle) ; Albi (XIe) ; St Etienne, St Martial, à Limoges, Valentré à Cahors, Entraygues, Estaing (XIIIe), Pavie, Vérone (III, p. 173) (XIVe).

16. — Ratisbonne, Avignon, La Guillotière, à Lyon (XIIe) ; Pont-St-Esprit (XIIIe) ; Montauban (XIVe), Toulouse, Trinité à Florence, Pont-Neuf à Paris (XVIe) ; Pont-Marie, Pont Royal (XVIIe),.....



Φ_1 – Pont de Blois — juillet 1908



Φ_2 – Pont de Joinville — août 1905

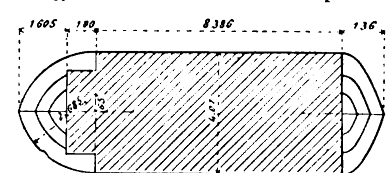
17. — Blois (1716-1724) (Φ_1), Joinville (Φ_2),...

18. — Compiègne (1733), Port-de-Piles, sur la Creuse (1747) (Φ_3, Φ_4), Orléans (1751-60), Mantes (1757-65), Tours (1764-77),...

19. - Neuville, sur l'Ain (1770-74), Fouchard, sur le Thouet, à Saumur (1773-84), Mirepoix, sur l'Hers (1773-92), Homps, sur l'Aude (1781-88),....

20. — Avant le XIXe siècle : Louhans, sur la Seille (1782-85), St-Dié, sur la Meurthe (1785-1821), Nemours, sur le Loing (1795-1804),....

f_{11} — Pont de Saint-Loup [21]



L'arrière-bec ne compte pas pour l'écoulement des eaux.

On peut le supprimer et réduire le volume de la pile et de sa fondation : si l'aspect n'en souffre pas ; quand les fondations sont sur un sol peu affouillable.

Sans le supprimer complètement, on peut l'aplatir en triangle obtus à lignes droites [22], ou courbes [23,24] (f_{11}).

Pont de Port-de-Piles, sur la Creuse

Φ_3 — amont — septembre 1906



Φ_4 — aval — septembre 1906



Art. 2. — Hauteur.

— Si les naissances sont au-dessus de l'eau, on y arrête les becs ; sinon, on les élève au moins jusqu'à l'extrados des bandeaux.

S'il y a de la navigation, ils doivent dépasser les « hautes eaux navigables », pour que les bateaux les voient et que le courant les rejette sous l'arche.

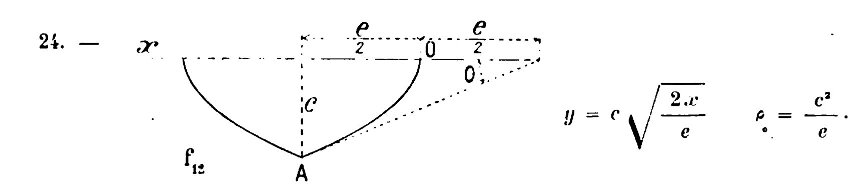
Les becs des ponts bas en plein cintre et en ellipse, qui s'élèvent au-dessus des naissances, sont comme rapportés, plaqués devant les ouvrages (Φ_3, Φ_4).

21. — sur l'Allier (La Ferté-Hauterive à Gannat), 1910-1913, 7 arcs de 33m à 1/7.5.

22. — Amidonniers (I, p. 193).

23. — Orléans (III, p. 257), Saint-Loup, (voir renvoi 21).

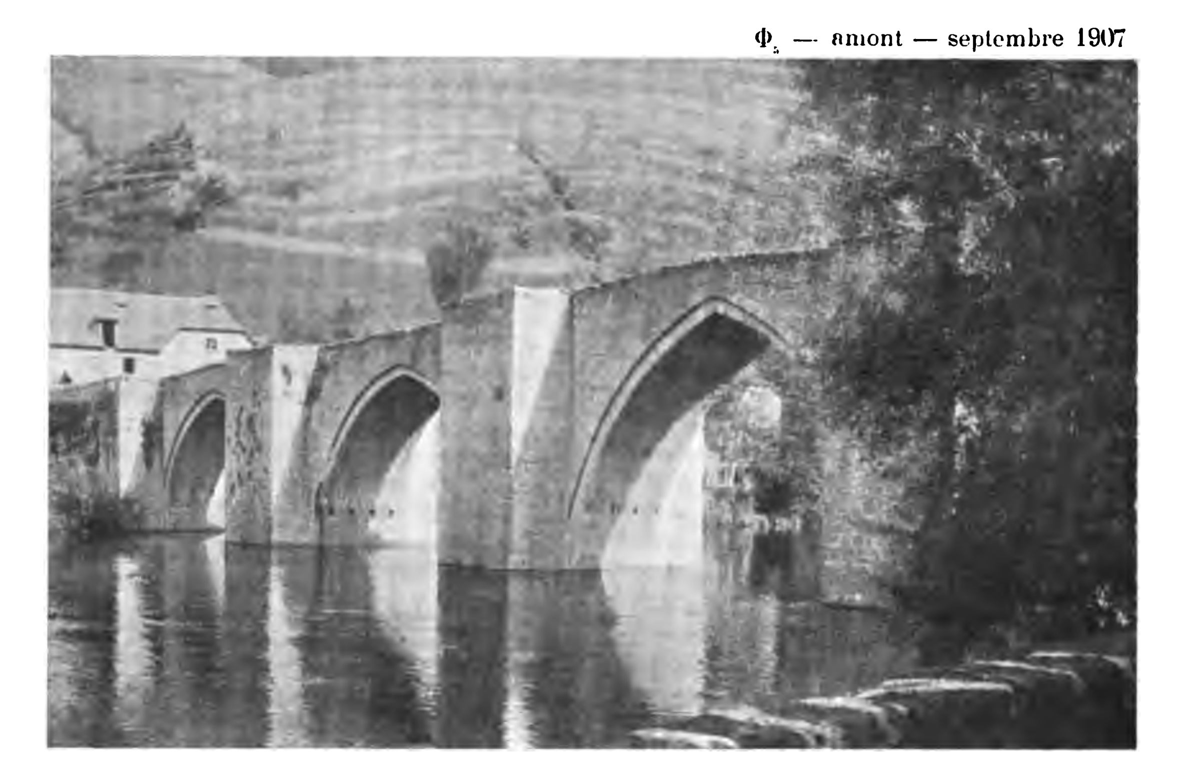
24. —

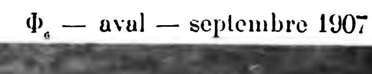


$$y = c\sqrt{\frac{2x}{e}} \qquad \rho_o = \frac{c^2}{e}.$$

Pont d'Entraygues (Aveyron), sur la Truyère (XIII[e] siècle)

Φ_5 — amont — septembre 1907





Φ_6 — aval — septembre 1907

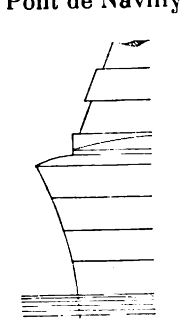


La fondation de la pile est mal utilisée si elle ne sert qu'à port
pour couper l'eau.

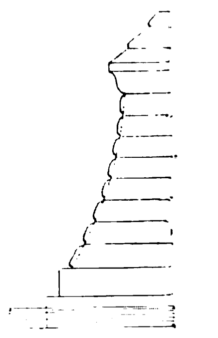
On peut élever le bec jusqu'à la voie et l'utiliser comme refu
très heureusement prolongé des becs triangulaires ou carrés (
heureusement des becs ronds [25].

Art. 3. — Profil des avant-becs. — On donne en gé
le même fruit qu'aux pieds-droits.

f_{13} Pont de Navilly



f_{14} — Pont des Amidonniers



Un courant qui heurte u
cale en affouille le pied.

Au pont de Navilly (178
profilé l'avant-bec en prou
forme très propre à provoqu
ments [27] (f_{13}).

Au pont des Amidonn
est concave, en forme d'ép
rencontrée bien tracée p
nir [28] (f_{14}).

Φ₇ — Pont à Dresde — septembre 1906



A u
($Φ_7$), les
sur des
nes q
gonflée
Ceci
imité,

Art
peron
becs es
peron.
fait tro
des po
(f_{15}), de
bon ef

On lui donnera de fortes épaisseurs, de fortes saillies : or
les dessins les moulures fines.

25. — Pont sur la Bidassoa, — Pont de Mauzac (Ligne de Bergerac au Buisso

26. — Annales des Ponts et Chaussées, 3e trimestre 1904, p. 5 à 130, Pl. 11 à 13. «
de Emiland Gauthey. — Le Pont de Navilly sur le Doubs ». M. de Dartein.

M. de Dartein a reproduit ce mémoire dans son grand ouvrage : « *Etudes sur les ponts en pi décoration, antérieurs au XIXe siècle* », vol. IV. — Paris, Béranger, 1909, p. 1 à 89, 173 à 189, PL. 23 à 3

27. — « *On constata en septembre 1787 un affouillement de 11 à 12 pieds de premier avant-bec et jusqu'au milieu de la longueur de la pile* ». Loc. cit. renvoi 26,

28. — L.). 1)3.

Mais il ne faut pas exagérer[29] (Φ_8).

Φ_8 — Pont Cornélius, à Munich[30] — août 1908



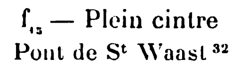
Φ_9 — Pont de Reichenbach, à Munich[31] — août 1908



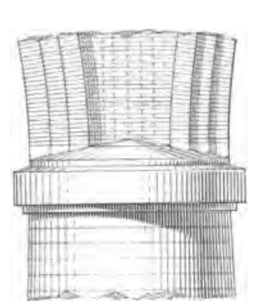
On a quelquefois supprimé le chaperon (Φ_9).

§ 4. — *RETOMBÉES DES BANDEAUX SUR LES BECS*

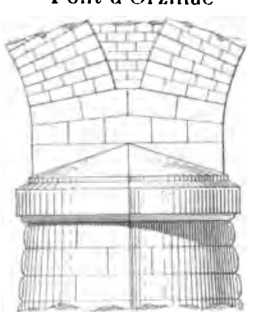
Art. 1. — Les naissances des voûtes sont plus hautes que les becs. — Pas de difficulté pour les pleins cintres (f_{15}), les ellipses (f_{16}), les arcs (f_{17}).



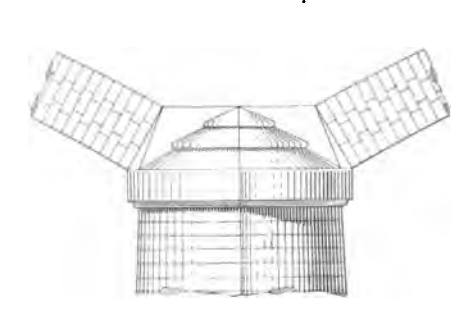
f_{15} — Plein cintre
Pont de St Waast[32]



f_{16} — Ellipse
Pont d'Orzillac[33]

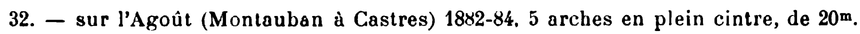


f_{17} — Arc
Pont de St Loup[34]



En faisant porter la retombée sur la moulure[35], on réduit la portée des voûtes (f_{17}) ; les Egyptiens avaient ainsi diminué par la saillie des chapiteaux la portée des architraves[36].

29. — Pont de Garching (IV, — Φ_1, p. 95, Φ_2, p. 97). 30. — Voir IV - p. 180. 31. — Voir IV - p. 183.



32. — sur l'Agoût (Montauban à Castres) 1882-84. 5 arches en plein cintre, de 20m.



33. — sur la Loire (Le Puy à Nieigles-Prades), 5 arches en ellipse, de 33m (Projet).

34. — Voir renvoi 21.

35. — Ponts de Charrey, d'Orléans (III, p. 257, — 4 — renvoi 4), de Saint-Loup (f_{17}).

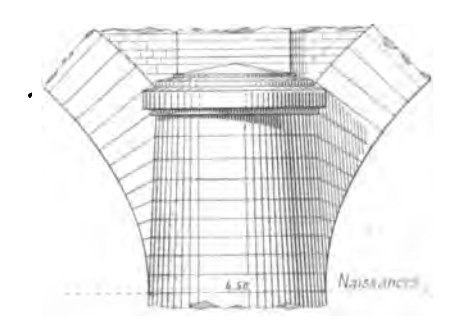
36. — La poussée de la voûte est oblique : la moulure porte peu. C'est ainsi qu'on a reçu sur un corbeau c (f_{18}) la retombée des nervures, à Sens, à Châlons (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », II, p. 294, 295).

f_{18}

Art. 2. — Les naissances sont plus basses que les becs. — A. *Pont en plein cintre ou en ellipse.* — Les ponts en plein cintre quelquefois, les ponts en ellipse souvent, sont des ouvrages bas : les becs coupent alors les bandeaux (Φ_{10}).


Φ_{10} — Pont de Marmande [37] — septembre 1904



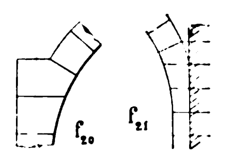


f_{19} — Pont de Marmande [37]

Il faut raccorder les assises de la pile, qui sont horizontales, à celles du bandeau, qui sont normales à l'intrados : on les « balance », de façon à n'avoir ni assises trop épaisses, ni voussoirs trop petits (f_{19}) : on n'y réussit pas toujours.

Il convient que le couronnement soit à la rencontre de l'extrados du bandeau et de l'arête de la pile [38], — non plus haut.

Au pont des Amidonniers, on a prolongé les assises de la pile jusqu'à l'intrados [39] ; les sommiers sont en porte-à-faux, « en tas de charge » [40].



37. — sur la Garonne (Marmande à Mont-de-Marsan), 1881-1885, 5 arches en ellipse de 36m à 1 3.6.

38. — On ne l'a pas fait, — à tort, — aux ponts de Moissac, (Φ_4, p. 93), à Bercy, au viaduc du Point-du-Jour.

39. — I, p. 196ter, f_{10}.

40. — On a reçu ainsi des nervures (f_{20}, f_{21}) (Choisy : « *Histoire de l'A[illegible]tecture* », II, p. 273, 294).

B. Ponts en arc — Quelquefois, on a prolongé les fûts au-dessus des bandeaux. Ils sont alors coupés brutalement, sans raccordement d'appareil (Φ_{11}).

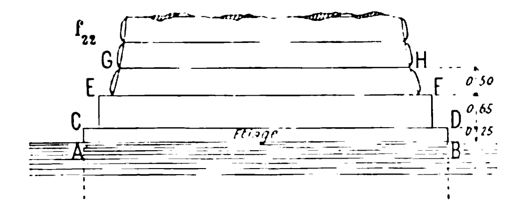
Φ_{11} — Pont « di Mezzo » sur l'Arno, à Pise — juin 1908



§ 5. — *NIVEAU DU SOCLE OU DU RESSAUT*

Il convient que le massif de fondation ne soit jamais découvert de plus de 40cm à 50cm et qu'on voie le socle la plus grande partie de l'année.

C'est d'après le graphique des hauteurs d'eau qu'on en fixe le niveau [41].



41. — Au pont des Amidonniers, l'eau est en moyenne par an :
4 jours au niveau AB ;
199 jours entre AB et CD.
10 jours entre CD et EF.
44 jours entre EF et GH.
18 jours au-dessus de GH.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET APPAREIL

§ 1. — *MASSIF DE FONDATION*

Art. 1. — Parement. — Dans les rivières qui charrien des cailloux, on parementera le massif en moellons durs, bien as de joints; on ne le fera jamais en béton, en béton armé : dans l hausses d'une fondation descendue à l'air comprimé ont dispa années.

Art. 2. — Noyau. — En maçonnerie ordinaire; à défau béton.

§ 2. — *AU-DESSUS DE L'EAU OU DU SOL*

Art. 1. — Socle. — Le socle est en libages ou en pierr

Art. 2. — Parement du fût. — Le parement est, sui le pont est bâti, — campagne ou ville, — suivant son caractèr équarris, en moellons d'appareil, en libages [42], en pierre de taille.

On ne paremente jamais une pile en moellons bruts : il y a t l'eau les attaque : il y faut des maçonneries assisées avec très peu

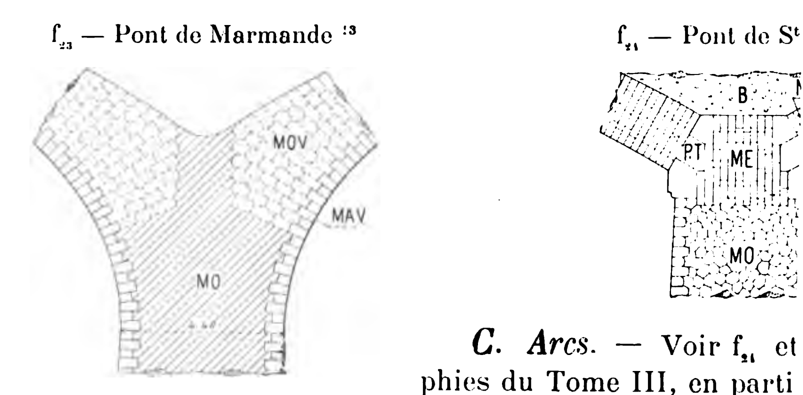
Art. 3. — Noyau. — Le noyau est en moellons ordinai quelquefois en béton, s'il coûte moins.

Si l'on craint qu'une trop forte pression tende à séparer le par on maçonne la pile au ciment, on la coupe par des assises de liba

Art. 4. — Appareil à la retombée des voûtes.

A. Pleins cintres. — Je renvoie à l'APPENDICE : Viaducs.

B. Ellipses. — Voir f_{22} et les monographies, Tome I.



f_{23} — Pont de Marmande [43]

f_{21} — Pont de S^t

C. Arcs. — Voir f_{21} et phies du Tome III, en parti Boucicaut (III, p. 243) et d'Orléans (III, p. 255).

42. — Pont des Amidonniers (I, p. 196bis, f_3). 43. — Voir renvoi 37. 44. -

Art. 5. — Quelques détails d'appareil. — Dans les arcs à grandes poussées, on dispose, derrière les sommiers en pierre de taille, des moellons équarris par assises verticales (f_{24}).

CHAPITRE III

EFFETS DES BECS SUR LE COURANT

Devant un avant-bec, l'eau se gonfle, puis s'écroule de chaque côté en cataractes (Φ_{12}), qui contrarient l'écoulement sous les voûtes et contractent le débouché [45].

Un avant-bec effilé gêne moins l'eau (Φ_{13}).

Φ_{12} — Pont St Clair, à Lyon — mai 1907



Φ_{13} — Pont d'Avignon — septembre 1903



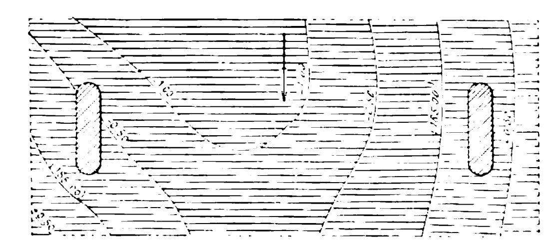
CHAPITRE IV

ACTION DES PILES SUR LES FONDS AFFOUILLABLES

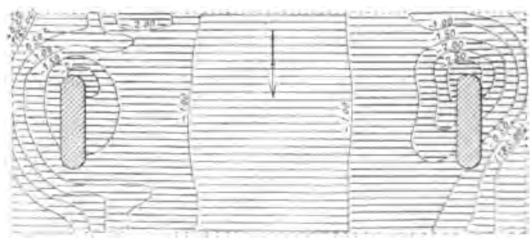
La rivière affouille le pied de l'avant-bec (f_{26}), dépose derrière l'arrière-bec.

Pont de Peseux sur le Doubs [46] — Plans — 1mm

f_{25} — Avant le commencement des travaux



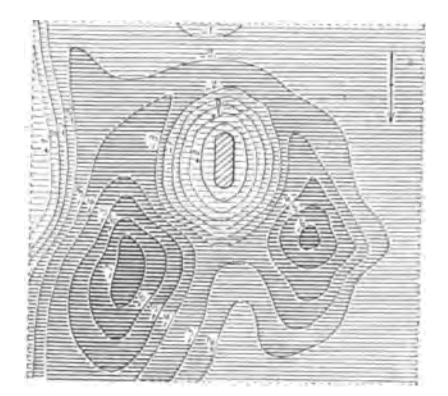
f_{26} — Après la crue du 14 avril 1901



45. — On trouve dans les Cours des valeurs du coefficient de contraction : elles prêtent fort à la critique ; on n'en a pas d'autres.

46. — Ligne de St Jean-de-Losne à Lons-le-Saulnier.

f_{27} — Passerelle du Collège, à Lyon

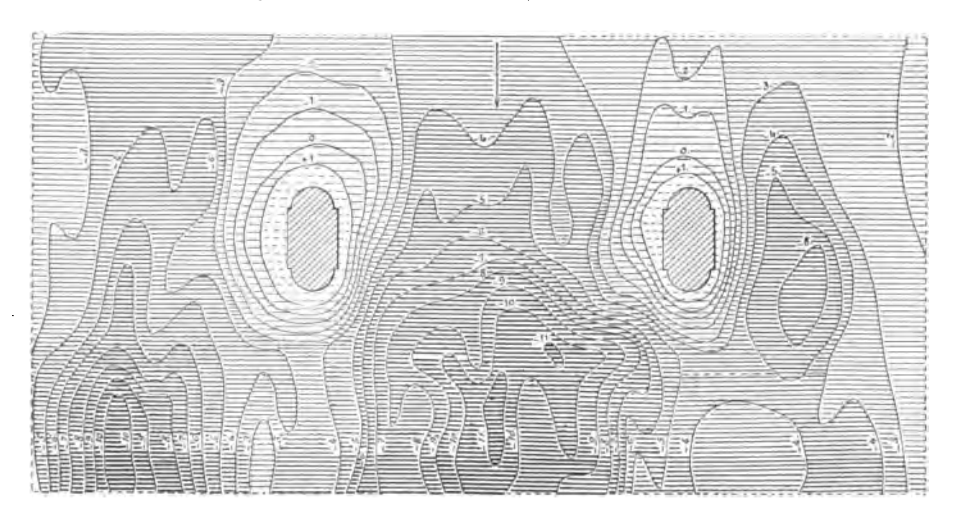


Quand on n'a pas fondé assez bas, on a défendu par des enrochements le sol affouillable.

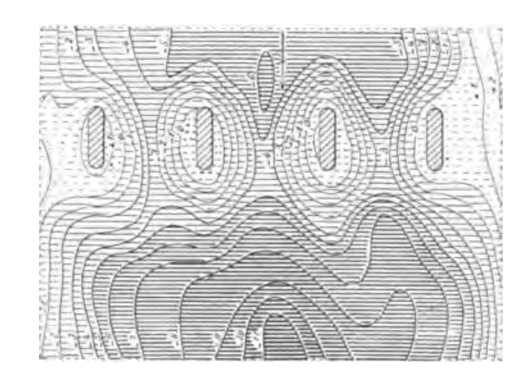
Sous un pont à très grandes portées, une pile entourée d'enrochements creuse deux trous à l'aval (f_{27}).

Sous de moindres, les affouillements d'aval se réunissent en un seul, dans l'axe des voûtes (f_{28}).

f_{28} — Pont de Tarascon, sur le Rhône [47]



f_{29} — Pont de Serin, sur la Saône, à Lyon



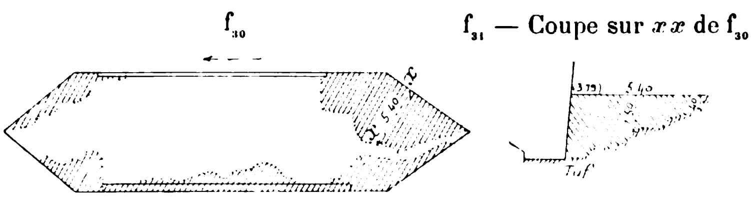
A l'aval d'un pont à trop petites arches, il y a un creux général en travers de la rivière (f_{29}), comme à l'aval d'un barrage.

Certains terrains compacts, incompressibles, sont lentement affouillables (tuf de la Garonne) [48], non par une crue, mais par l'action continue des eaux.

En tout terrain, il faut fonder au-dessous des plus grands affouillements connus.

Avec l'air comprimé, c'est souvent facile, toujours possible : un Ingénieur qui ne fonde pas assez bas est aujourd'hui sans excuse.

f_{30} f_{31} — Coupe sur xx de f_{30}



47. — Ligne de Tarascon à Cette (1851).

48. — Au vieux pont de Toulouse (1542-1632), la pile 3 a été affouillée jusqu'à 5m40 (f_{30}, f_{31}).

TITRE V

CULÉES

CHAPITRE I

COMMENT ON CALCULE LEURS DIMENSIONS

§ 1. — *EFFORTS QUE SUPPORTENT LES CULÉES*

Art. 1. — De la part des voûtes. — Sur les piles, les poids, les surcharges ne produisent que des efforts verticaux ou à peu près : mais sur les culées, ils se résolvent en poussée.

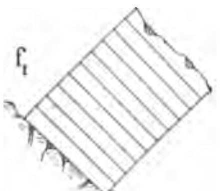
Moins la voûte a de flèche, plus la poussée est inclinée.

Art. 2. — De la part des terres. — La poussée des terres[1] agit en sens contraire de celle de la voûte ; elle soulage l'arête postérieure de la culée ; elle en écarte la courbe de pression.

Dans le calcul de la culée, on n'en tient pas compte : on ne remblaie en effet l'ouvrage qu'achevé ; la culée doit avoir résisté à la poussée de la voûte sans l'aide de celle des terres.

§ 2. — *CE QU'IL FAUT POUR RÉSISTER AUX EFFORTS*

Art. 1. — La voûte retombe sur le rocher. — On taille le rocher suivant le dernier lit : c'est le cas des passages supérieurs sur tranchées en rocher, des arches jetées par-dessus un torrent entre deux parois de rocher.



Art. 2. — La culée résiste par son poids.

Si l'on a fondé par épuisement dans un batardeau, ou sur pilotis, ou à l'air comprimé, le sol de fondation est à peu près horizontal : c'est par son poids que la culée résiste à la poussée.

A toute hauteur, la maçonnerie doit ne pas s'écraser, ne pas se couper horizontalement[2].

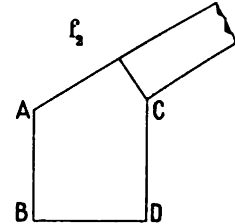
La culée ne doit ni s'enfoncer dans le sol[3], ni glisser sur lui.

1. — Voir les Tableaux numériques de M. Flamant (Annales des Ponts et Chaussées 1885, 1er semestre, p. 523), reproduits à la fin du Cours de *Ponts en maçonnerie* de MM. Degrand et Résal, Tome I, p. 380 et suivantes.

2. — Soient, par rapport au pied de l'arête postérieure : $\mathfrak{M}_s$ le moment de stabilité, $\mathfrak{M}_r$ le moment de renversement. — On a souvent admis que le rapport $C = \frac{\mathfrak{M}_s}{\mathfrak{M}_r}$ dit « coefficient de stabilité » mesurait la stabilité de la culée, et qu'elle était stable avec C = 1,5. M. Résal a montré que cette conception était fausse, dangereuse ; que, pour la stabilité de l'ouvrage, on n'en pouvait rien conclure (*Stabilité des Constructions*, p. 559 et suivantes). — Ce n'est pas le rapport $\frac{\mathfrak{M}_s}{\mathfrak{M}_r}$ qui est intéressant, mais la différence $\mathfrak{M}_s - \mathfrak{M}_r$, laquelle entre dans l'expression de la pression maxima.

3. — Pour une même pression par unité, la déformation du sol croîtrait avec la surface de fondation. Zentralblatt der Bauverwaltung, 1893, p. 306 à 308 : « *Zur Theorie des Baugrundes* » Fr. Engesser.

Enfin, elle doit être rigide, c'est-à-dire ne pas se courber sous la poussée. L'arête postérieure AB (f_3) est plus comprimée que CD : le haut de la culée reculera donc légèrement sous la poussée[4] : elle pliera comme un poteau vertical élastique encastré à son pied, poussé horizontalement à son sommet[5].



Pour calculer les pressions dans les voûtes, on suppose expressément que les retombées ne reculent pas.

Les appuis d'un arc très surbaissé à grande portée doivent être invariables : le moindre déplacement horizontal est dangereux.

Sur des culées hautes, conviennent des pleins cintres, des ellipses surhaussées.

Plus le sol est douteux, moins il faut le charger, plus il faut de flèche.

Les voûtes très surbaissées exigent des culées rigides, partant, très longues[6].

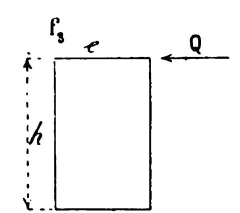
CHAPITRE II

DISPOSITIONS DES CULÉES

§ 1. — *RENVOI AUX MONOGRAPHIES ET A L'APPENDICE*

Les culées se font à la demande du terrain.

Je renvoie aux monographies (Tomes I à IV) pour celles des voûtes de 40m et plus, — à l'APPENDICE pour celles des ouvrages courants et des viaducs.



4. — Soit une culée d'épaisseur constante e, soumise à une poussée Q; le déplacement au sommet est : $f = \frac{2Qh^3}{Ee^3}$.

D'où : $e = h\sqrt[3]{\frac{2Q}{Ef}}$

e varie : pour un même déplacement f, comme la hauteur h ; pour un même travail à toute hauteur, comme $\sqrt{h}$.

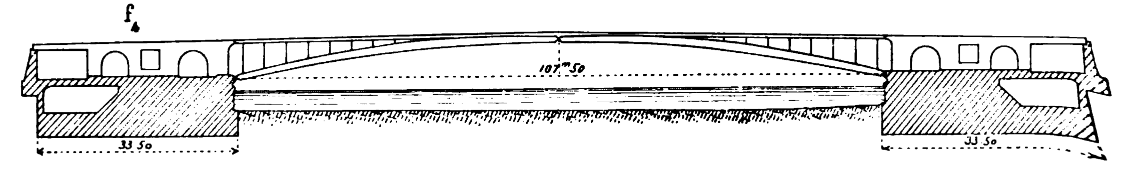
M. Résal : « *Stabilité des Constructions* », p. 556.

5. — Arche d'expériences de Souppes (Portée = 37m886, Surbaissement 1/18).
La culée avait 15m10 : on a enlevé à l'arrière des tranches verticales.

Quand elle a été réduite de	à	le tassement total à la clef a été de :
15m10	12m10	0mm3
12m10	10m10	2mm7
10m10	7m10	6mm3

A 7m10, la culée ne se renversait pas, ne s'écrasait pas ; mais elle commençait à plier sous la poussée.
Voir Tome III, p. 376, renvoi 31.

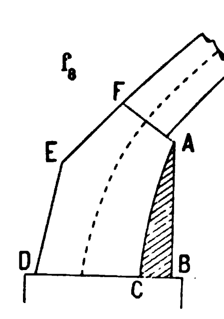
6. — Au pont Alexandre III (f_4) (arcs d'acier de 107m50 au 1/17e), les deux culées ont ensemble 67m, — les 64/100 de la portée.



§ 2. — *ÉPAISSEURS*

On les détermine par une épure [7,8].

§ 3. — *CULÉES A PAREMENT ANTÉRIEUR EN PORTE-A-FAUX OU EN ENCORBELLEMENT. — CULÉES PERDUES*



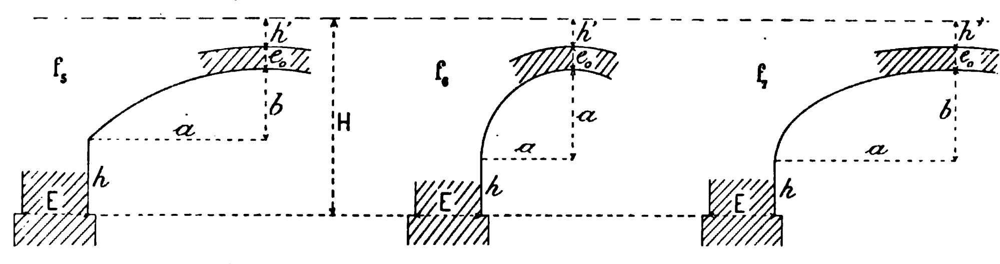
Dans une culée telle que f_8, la maçonnerie ABC travaille peu ; on peut la supprimer.

La culée en porte-à-faux, fort économique, est à adopter pour les grandes voûtes par-dessus les torrents, les ravins profonds.

On peut faire ainsi, non seulement avec retombées inclinées (Lavaur [9], Antoinette [10], Luxembourg [11], Amidonniers [12], — passages supérieurs en tranchée de rocher), mais même avec fondations profondes sur sol horizontal [12bis].

7. — APPENDICE. — Comment on calcule une voûte.

8. — Voici, pour un premier essai, les formules de Léveillé :



Arc de cercle (f_5) : $$E = \left(0,33 + 0,212\ (2a)\right) \sqrt{\frac{h \times (2a)}{H\,(h + e_0)}}.$$

Plein cintre (f_6) : $$E = \left(0,60 + 0,162\ (2a)\right) \sqrt{\frac{[h + 0,25\ (2a)] \times 0,865\ (2a)}{H\,[0,25\ (2a) + e_0]}}.$$

Anse de panier (f_7) : $$E = \left(0,43 + 0,154\ (2a)\right) \sqrt{\frac{(h + 0,54\,b) \times 0,84\ (2a)}{H\,[0,465\,b + e_0]}}.$$

« *Note sur les Ponts en maçonnerie* » par M. Léveillé, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. (Extrait du Bulletin de la Société d'Agriculture, Sciences et Arts de la Sarthe, — Le Mans, Imprimerie Monnoyer, 1855).

Voici, pour 3 ponts en arc, l'épaisseur calculée par la formule Léveillé et celle qu'on a adoptée :

Ponts	Formule Léveillé	Épaisseur adoptée
Boucicaut (III, p. 243).	13m06	14m07
de la Farelle (1877-1880 — *Ligne de Mende à Sévérac*).	11m18	11m35
d'Orléans (III, p. 255).	15m07	15m

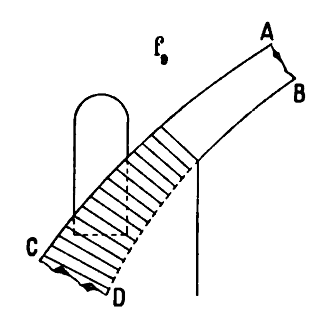
9. — II, p. 135 ; 10. — II, p. 145. — Le grès mollasse a été taillé suivant le lit de la dernière assise.

11. — II, p. 67. — Grès en petites assises horizontales. Les fouilles faites formaient une série de petits ressauts. On les a noyés dans du béton de ciment, damé suivant la courbe de la retombée.

12. — I, p. 193.

12bis. — Höfen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Munderkingen (IV, p. 55), Grasdorf (IV, p. 129), Göhren (IV, p. 139), Inzigkofen (IV, p. 225), Neckarhausen (IV, p. 232), Teinach (III, p. 203), Mehring (III, p. 252), Cassel (III, p. 303).

Pour résister à la poussée, on a quelquefois chargé les culées perdues en avant du porte-à-faux[13].



§ 4. — *CULÉES ÉVIDÉES*

Il ne faut pas couper ou entailler la retombée d'une grande voûte ABCD (f_9) par un évidement transversal allant d'un tympan à l'autre.

Mais il est permis d'évider par des puits ronds de petit diamètre la culée d'un plein cintre[13 bis] : la poussée passe autour des puits.

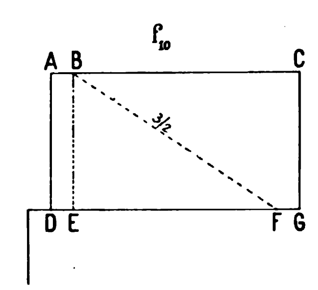
§ 5. — *PRÉCAUTIONS CONTRE LE GLISSEMENT*

Quand on le peut, on découpe le sol normalement à la résultante des efforts[14] ; on bute le massif contre le rocher ; on dispose des ergots[15], des gradins[16] ; on élargit la culée par rapport à la voûte[17].

§ 6. — *CULÉES LONGUES ET HAUTES*

COMMENT ON SUPPORTE ÉCONOMIQUEMENT L'ABOUT DU PARAPET

Soient (f_{10}) : BF la trace du quart de cône sur le mur de la culée, EF sa projection horizontale.



En AB, pour que l'extrémité A ne soit pas déchaussée, on ménage un jeu de 0m30 ou 0m40 ; de même, en FG, pour garantir le pied du talus.

L'extrémité A ne sert qu'à porter le garde-corps : si la culée est haute, la fondation profonde, on la mettra en porte-à-faux :

sur des dalles portées par des consoles ;

sur des voûtains portés par des corbeaux ;

13. — Höfen (IV, p. 41), Marbach (IV, p. 45), Baiersbronn (IV, p. 48), Inzigkofen (IV, p. 225), Neckarhausen (IV, p. 232), Mehring (III, p. 253), Cassel (III, p. 303).

13bis. — Voir APPENDICE, Viaducs.

14. — Lavaur (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 193).

15. — Marbach (IV, p. 45), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242), Göhren (IV, p. 139).

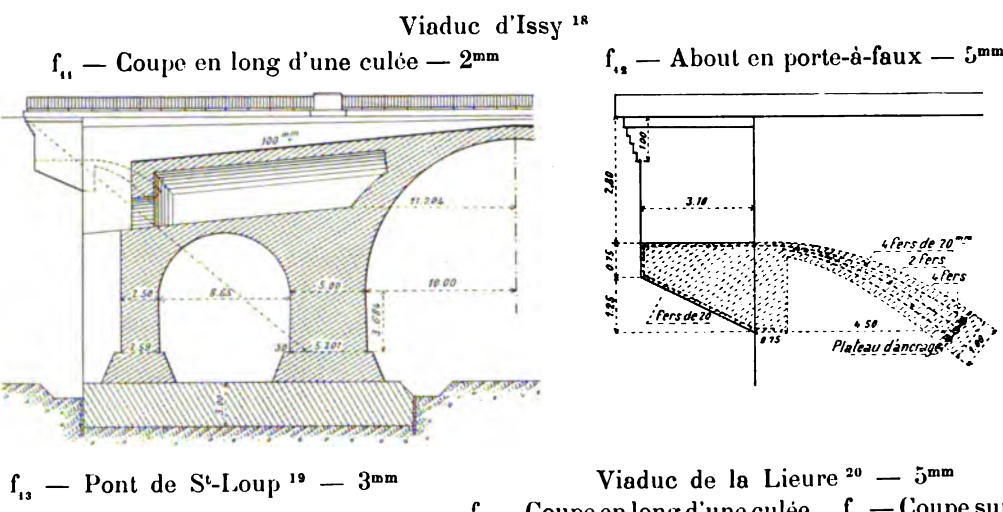
16. — Teinach (III, p. 203), Illerbeuren (IV, p. 159), Moulins-lez-Metz (IV, p. 202).

17. — Neckarhausen (IV, p. 232), Prince-Régent (IV, p. 239).

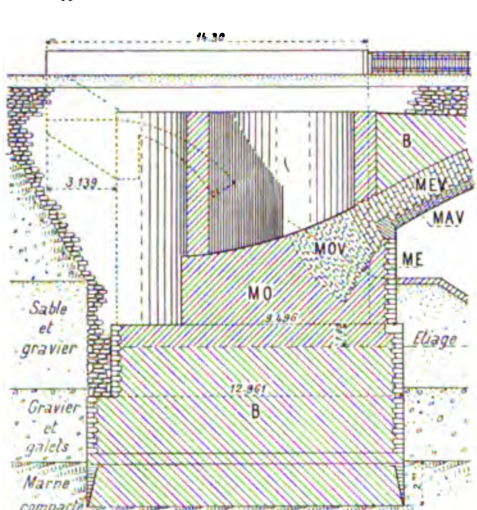
maintenant, sur des consoles en béton armé (f_{12}, f_{13}) [18] : les consoles doivent rester cachées dans le quart de cône ;

Viaduc d'Issy [18]

f_{11} — Coupe en long d'une culée — 2mm f_{12} — About en porte-à-faux — 5mm

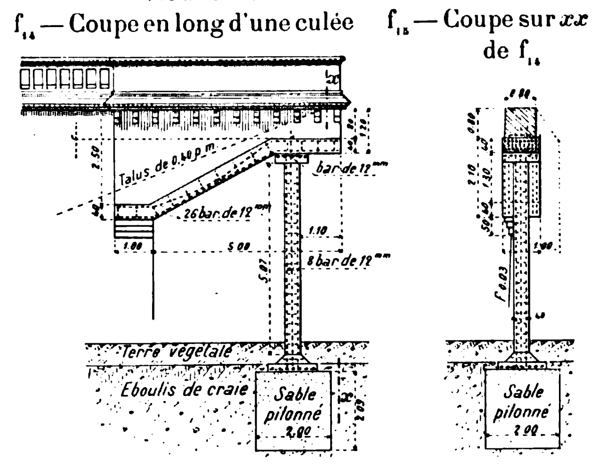


f_{13} — Pont de St-Loup [19] — 3mm

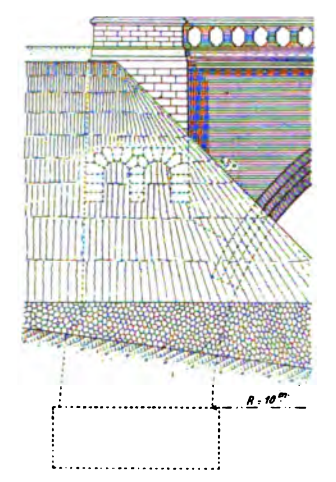


Viaduc de la Lieure [20] — 5mm

f_{14} — Coupe en long d'une culée f_{15} — Coupe sur xx de f_{14}




f_{16} — Pont de St-Waast[21] — 5mm



sur des béquilles en béton armé (f_{14}, f_{15}) [20] : il faut qu'elles s'appuient sur un terrain solide ; s'il tasse sous le poids du remblai, la béquille descend et ne porte plus l'about de la console.

De même, pour porter un dé à l'about du parapet, on n'élargira pas la culée sur toute sa hauteur : on le mettra en porte-à-faux sur des voûtains (f_{16}).

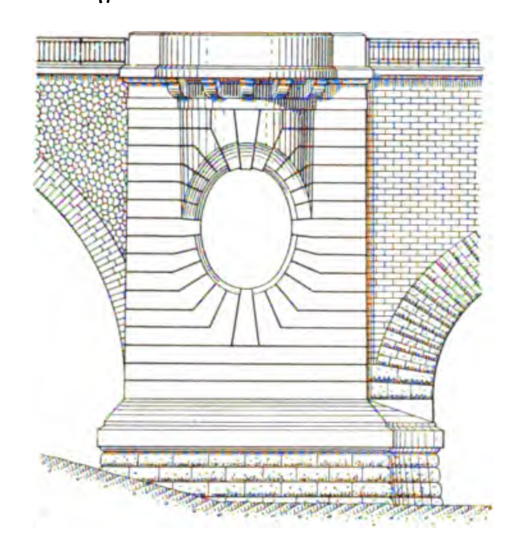
18. — *« Note sur les travaux de la ligne d'Issy à Viroflay »*. M. Rabut, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur Principal de la Cie de l'Ouest. (Revue Générale des Chemins de fer, juillet 1902, p. 13).

19. — sur l'Allier (1910-13). Ligne de la Ferté à Gannat, 7 arcs de 33m à 1/7.5.

20. — Ouvrages de la ligne de Charleval à Serqueux. M. Rabut.

21. — sur l'Agoût (1882-84). Ligne de Montauban à Castres.

f_{17} — Pont d'Orzillac [22] — 4mm

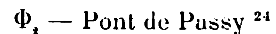


§ 7. — *CULÉES ENTRE ARCHES INÉGALES*

Une large culée entre l'ouvrage principal et des arches d'accès n'est point agréable à voir : on l'accidente souvent par des pilastres (Φ_1) ; on y ouvre un œil-de-bœuf (f_{17}, Φ_2).

Φ_1 — Pont de Marmande [23]





Φ_2 — Pont de Passy [24]



CHAPITRE III

MATÉRIAUX. — APPAREIL

Art. 1. — Parement [25]. — Suivant l'expression à donner, les faces seront en moellons bruts (M O I) [26], en moellons assisés (M O H, M E H) [26], avec arêtes en moellons d'appareil (M A) [26], en libages (L) [26].

La culée doit être et paraître robuste.

Il convient souvent d'y supprimer la plinthe [25] :

Les culées ne sont pas l'ouvrage : elles l'encadrent ; elles peuvent être brutales [27].

22. — sur la Loire. Ligne du Puy à Nieigles-Prades (Projet).

23. — Voir renvoi 37, p. 37.

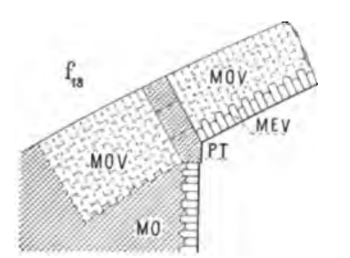
24. — Ligne Paris-St-Lazare-Invalides (Projet de M. Bonnet, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Cie de l'Ouest).

25. — Voir à l'Appendice, l'appareil des culées des petits ouvrages, des viaducs.

26. — Pour le sens de ces abréviations, voir Titre I, p. 7.

27. — Luxembourg (II. p. 67).

Art. 2. — Corps de la culée. — Disposition des assises. — Les voûtes sont en matériaux de choix : on y admet un travail élevé. Mais leurs culées, sauf celles des très grandes, sont en " M O " [28], tout au plus en " M O V " [28] : on y abaisse le travail.



Sous les retombées des très grandes, on range les moellons par assises courbes, normales à la pression et aux deux parements.

Dans les voûtes en ellipse, les culées commencent aux reins.

Dans les culées des grands arcs surbaissés, le devant, qui travaille peu, reste en moellons ordinaires. On appareille la retombée de la voûte : c'est comme une culée perdue dans la maçonnerie (f_{18}).

Art. 3. — Culées armées. — A des ponts allemands récents [29], fondés sur pilotis, on a noyé dans les culées plusieurs cours de rails.

Dans des ponts autrichiens, on a étalé la pression sur le sol par une dalle en béton, armée de rails [30].

28. — Voir renvoi 26.

29. — Wengern (III, p. 207), Ziegenhals (III, p. 208), Krappitz (III, p. 265), Gross-Kunzendorf (III, p. 267).

30. — Palmgraben (II, p. 165), Schalchgraben (II, p. 169), Krenngraben (III, p. 134), Salcano (III, p. 141).

Au viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude, — 9 arches en plein cintre de 20^{m}, 1909-11), nous avons ainsi réduit la pression de $7^{k}4$ à $3^{k}4$ sur l'argile, — de $7^{k}4$ à $5^{k}8$ sur la moraine.

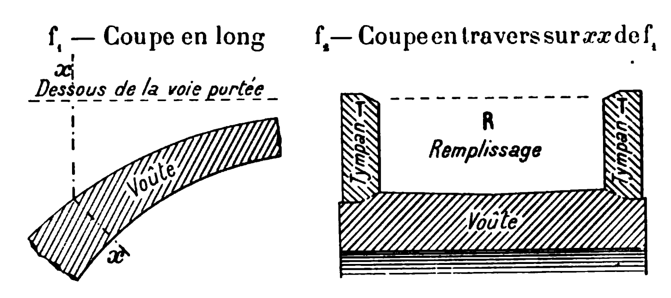
TITRE VI

VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE

CHAPITRE I

VOLUME PLEIN

Art. 1. — Tympans. — Le volume entre le dessus des grandes voûtes et le dessous de la voie portée est occupé par un remplissage R entre deux murs de tête T, dits tympans[1] (f_1, f_2).



Art. 2. — Murs de tête. Matériaux et appareil. — Les tympans chargent les voûtes et travaillent peu.

Il y faut des matériaux légers[2], et qui paraissent légers, au besoin peu résistants : ce qui est porté doit être et paraître moins lourd que ce qui porte. Même dans une très grande ville, il n'y faut point de grand appareil.

On y a employé du tuf[3], des briques[4], du béton[5], soit sur toute l'épaisseur, soit seulement en parement ; on a doublé de béton maigre un mince parement[6].

C'est à tort qu'on les a faits parfois en meilleurs matériaux que la voûte[7].

Il peut convenir de les distinguer des voûtes et du couronnement par la couleur (briques[8]), par la taille des matériaux (joints incertains...),....

1. — Pour l'épaisseur des tympans et le remplissage entre eux, pour l'appareil le long des bandeaux, voir APPENDICE, Viaducs.

2. — Les Romains ont très souvent employé dans leurs voûtes pour y réduire les efforts, des ponces, des tufs volcaniques poreux (Colisée, Thermes de Titus et de Caracalla,....) à l'exclusion des pierres à tissu compact. (Choisy : *L'Art de bâtir chez les Romains*, p. 96).

3. — Les tympans sont : au pont du Diable (I, p. 116) en tuf lacustre de Pœstum pesant 1000k et s'écrasant à 10k ; au pont de Fium'Alto (I, p. 110), en maçonnerie s'écrasant à 32k.

4. — Putney (III, p. 239) : corps en briques.

5. — Parements en béton moulé aux ponts de : Krenngraben (III, p. 134), Steyrling (III, p. 137), Palmgraben (II, p. 164), Schalchgraben (II, p. 168).

6. — Boucicaut (III. p. 243).

7. — Tympans en pierre et voûtes en briques : Calcio (III, p. 100), Diveria (III, p. 130) ; viaducs italiens, notamment ceux de la ligne en construction de Coni à Vintimille.
Tympans en pierre de taille et voûtes en béton : Coulouvrenière (IV, p. 81),...

8. — Antoinette (II, p. 145), Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), Orléans (III, p. 255), Amidonniers (I, p. 193).

CHAPITRE II

AU-DESSUS DE QUELLES VOÛTES A-T-ON ÉVIDÉ, ET COMMENT ?

§ 1. — *QUAND FAUT-IL, QUAND NE FAUT-IL PAS ÉVIDER ?*

Même en matériaux légers, le volume entre l'extrados et le dessous de la voie ne laisse pas de peser lourdement sur les voûtes.

Quand il est grand, — c'est-à-dire au-dessus des grandes voûtes peu surbaissées, — il y a intérêt à l'évider [9].

On n'évide pas, - ou guère, - au-dessus des pleins cintres de moins de 15^m [10], des arcs peu surbaissés ou des ellipses de moins de 20^m, des arcs très plats de toute portée [11].

On n'évide pas non plus de façon apparente un pont bas, qu'on veut massif, robuste.

§ 2. — *COMMENT ON ÉVIDE*

On évide :

soit en travers, par des voûtes s'arrêtant aux murs de tête (évidements cachés), ou les traversant (évidements apparents) ;

soit en long, par des voûtes, par des dalles ;

soit à la fois en long et en travers : voûtes sur arcades, voûtes d'arête, dalles sur piliers.

Voici ce qui a été fait au-dessus des voûtes de 40^m et plus :

Ponts construits				Pleins cintres C	Ellipses E	Arcs peu surb.	Arcs assez surb.	Arcs très surb.	En tout			
avant 1881	*Pas d'évidements*			2	5	5	6	1	»	»	19	42
	Évidements	en travers	cachés	»	3	2	2	»	7	11	23	
			vus	1	1	1	1	»	4			
		en long	sous voûtes	3	1	1	2	»	7	11		
			sous dalles ou plate-forme	1	2	1	»	»	4			
		dans les 2 sens	cachés	»	»	»	»	1	1	1		
			vus	»	»	»	»	»	»			
après 1881	*Pas d'évidements*			»	2	1	7	14	»	»	24	111
	Évidements	en travers	cachés	»	»	»	»	1	1	60	87	
			vus	4	5	16	17	17	59			
		en long	sous voûtes	1	2	»	2	2	7	13		
			sous dalles ou plate-forme	»	»	»	1	5	6			
		dans les 2 sens	cachés	1	»	»	»	4	5	14		
			vus	»	»	»	2	7	9			

Ainsi, depuis 1881, on a construit 111 ponts à voûtes de 40^m et plus : on en a évidé 87, dont 59 par des voûtes transversales apparentes.

9. — En élégissant, on a abaissé la pression moyenne à la clef, au passage d'un train, de 19^k à 17^k au pont de Lavaur, de 20^k à 18^k au pont Antoinette.

10. — Appendice ; — Viaducs.

11. — Arcs très surbaissés, de 40^m et plus, à tympans non évidés :

Pont	Tome, p.	Portée	Surbaissem^t	Pont	Tome, p.	Portée	Surbaissem^t
Mosca	III-199	45^m	1/8.18	de Ziegenhals	III-208	40^m	1/9.52
Boucicaut	III-243	40	1/8	de Neuhammer	III-211	52	1/8.7
de Huzenbach	III-206	41.50	1/8.25	de Gross-Kunzendorf	III-267	40	1/9.52
de Malling	IV-175	40	1/8.56	d'Avignon	III-270	40	1/8
Cornélius	IV-180	41	1/12	de Bellows-Falls	III-225	42.67	1/7

CHAPITRE III

ÉVIDEMENTS TRANSVERSAUX CACHÉS

Le mur de tympan n'y est qu'un masque.

On a évidé, on évide ainsi des viaducs à plein cintre[12].

Sur 8 ponts ayant des voûtes de 40m et plus, à évidements transversaux cachés, un seulement est postérieur à 1881[13].

C'est un mode d'évidement fort ancien[14].

CHAPITRE IV

ÉVIDEMENTS TRANSVERSAUX APPARENTS

§ 1. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT A PETITES ARCHES EN PLEIN CINTRE COURANT SUR LE DOS DE LA GRANDE VOÛTE*

Art. 1. — Ponts à une seule grande arche.

Voici ce qui a été fait :

Voie portée[15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaisst σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Évidements, Piles: Épaisseur E'	Évidements, Piles: Hauteur max. sous clef H'	Évidements, Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
					Pleins cintres C[1]						
rte	1899-1900	Brent	Suisse	I - 34	44m	»	4m	*0.090*	1m00	15m75	*0.25*
rte	1901-03	Le Bachelard	France	»	32	»	4.08	*0.127*	0.80	10.63	*0.38*
Fr	1898-1900	Rébuzo	France	I - 48	40	»	4.10	*0.102*	1.10	9.75	*0.42*
Fr	1904-05	Dössenbach	Autriche	»	32	»	1.5, 2.5, 3	*0.092*	1.20 et 1.30	8.3	*0.36*
fr	1901-02	Solis	Suisse	I - 55	42	»	3.50	*0.083*	1 et 1.20	7.5	*0.47*
					Ellipses surbaissées E[1]						
rte	1886	Saint-Pierre	France	I-120	40	1/3.33	4	*0.100*	0,90	7	*0.57*
rte et Fr	1909-10	Havrincourt	France	»	38.70	1/2.42	3.50	*0.090*	0.80	8.53	*0.41*
					Ellipse surhaussée E^1_h						
fr	1906-09	Wiesen	Suisse	I-235	55	1/1.65	4	*0.073*	1 — 1.20 1.40	21	*0.19*

12. — APPENDICE — Viaducs.

13. — EVIDEMENTS TRANSVERSAUX CACHÉS, AU-DESSUS DE VOÛTES ⩾ 40m :

Évidements :	Dates	Ponts :	Monographie Tome, p.	Portée	Surbaissement
en plein cintre	1842-46	Saint-Etienne *(Autriche)*	II - 55	43m60	1/2.471
en arc	1351-1583	Tournon *(France)*	II - 35	49.20	1/2.775
	1845-47, 1874-77	Bains de Lucques *(Italie)*	III - 32	47.835	1/6.71
	1857-64	Cabin John *(Etats-Unis)*	III - 75	67.10	1/3.84
	1873-75	Mantes *(France)*	I - 160	40	1/3.5
	1906-07	*Elise (Allemagne)* (voûte articulée)	IV - 151	47.50	1/9.89
annulaires	1868-70	Annibal *(Italie)*	I - 112	55	1/3.92
	1871-72	Diable *(Italie)*	I - 116	55	1/4.06

14. — Au vieux pont d'Orléans, la pile 7 s'était enfoncée en 1758-59 de 49cm. On soulagea les piles 5, 6, 7, 8 en traversant au-dessus d'elles par 3 voûtes la maçonnerie des reins.

Perronet. « *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres...* » Paris, Imprimerie royale, MDCCLXXXIII, Tome 2e, p. 14, 15, Pl. XXXIII.

En restaurant le pont de Tours (1764-77), Beaudemoulin a trouvé des voûtes intérieures qui s'appuyaient, par un large empattement, sur les reins des grandes arches. (Annales des Ponts et Chaussées, 1839, 2e semestre, p. 86 à 133.)

15. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos d'une grande voûte *(Suite)*.

Voie portée[15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes > 40 m, voir la Monographie Tome	p.	Grandes voûtes Portée 2 a	Grandes voûtes Surbaiss^t σ	Évidements Portée 2 a'	Évidements Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Piles Épaisseur E'	Piles Hauteur max. H'	Piles Rapport $\frac{2a'}{H'}$
						Arcs peu surbaissés $\widehat{A}^1$						
	1899–1903	Luxembourg	Luxembourg		67	84m65	1/2.73	5m40	*0.063*	1m08	15.6	*0.34*
	1906–08	Walnut-Lane	États-Unis		83	70.71	1/3.31	6.10	*0.086*	1.22	21.5	*0.25*
	1908–10	Rocky-River	États-Unis	II	95	85.34	1/3.46	6.40	*0.075*	1.22	23.35	*0.27*
rte	1908–12	Constantine	Algérie		107	68.76	1/2.76	4.75 r. d. 4.85 r. g.	*0.070*	1	13.75	*0.35*
	1905–07	Le Bachelard	France		»	30	1/2.72	5	*0.16*	0.90	7.50	*0.66*
	1882–83	Castelet	France		130	41.20	1/2.94	4	*0.097*	0.80	8.10	*0.49*
	1882–84	Lavaur	France		135	61.50	1/2.24	4.50	*0.073*	1.10	11.40	*0.39*
	1883–84	Antoinette	France	II	145	50	1/3.14	4	*0.080*	0.96	9.50	*0.42*
	1883–84	Wäldlitobel	Autriche		157	41	1/3.10	2	*0.050*	1.20	8.50	*0.24*
	1883–85	Céret	France		160	45	1/2.31	3	*0.066*	1.50	9.10	*0.33*
Fr	1889–90	Villefranche de Conflent	France		»	39.35	1/2.31	4.5 et 5	*0.127*	1	9.30	*0.53*
	1896	Gruniéret	France		»	35.50	1/3.27	3	*0.084*	»	6.19	*0.48*
	1904–05	Paimgraben	Autriche		164	49	1/3.93	3	*0.061*	1.20	10.20	*0.30*
	1904–05	Schalchgraben	Autriche		168	52	1/3.46	3.20	*0.061*	1.20	10.20	*0.31*
	1904–06	Rothweinbach	Autriche		171	41	1/2.68	3	*0.072*	1.20	9.25	*0.32*
	1907–09	Escot	France		174	56	1/2.99	4.5 r. g. 4.75 r. d.	*0.084*	0.91 0.92	9.25 10	*0.46* *0.48*
	1906–08	Ramounails	France	II	186	40.30	1/3.12	3.50 r. d. 4 r. g.	*0.086* *0.099*	0.70 0.90	9 7.5	*0.39* *0.53*
fr	1910–12	Cinuskel	Suisse		189	46.98	1/2.32	4	*0.085*	1 et 1.2	15	*0.27*
	1911–12	Tuoi	Suisse		194	47.71	1/2.23					
	1910–12	Mela	Suisse		»	38.96	1/2.41	3.50	*0.090*	1 et 1.2	11.8	*0.29*
						Arcs assez surbaissés $\widehat{A}^1$						
	1901	Saint-Chely-du-Tarn	France		»	39	1/5.41	2.25	*0.057*	0.80	5.74	*0.39*
rte	1908–09	Montanges	France	III	62	80.29	1/3.92	5.30	*0.066*	1.06	20.40	*0.26*
	1903–04	La Brague	France		»	30	1/6	1.90	*0.063*	0.60	4.25	*0.44*
	1888–89	Gour-Noir	France		103	62	1/3.73	4.30	*0.069*	0.95	11.20	*0.38*
	1890	Pouch	France		110	47.85	1/3.68	4.90	*0.102*	1.10	10.50	*0.46*
	1890–91	Freyssinet	France		112	45	1/4.00	4.50	*0.100*	1.00	8.50	*0.52*
	1893–94	Jaremeze	Autriche		114	65	1/3.63	3.60	*0.055*	»	16.80	*0.21*
	1893–94	Jamna	Autriche		118	48	1/4	3.50	*0.072*	»	19.20	*0.34*
	1893–94	Worochta	Autriche	III	120	40	1/4	3.50	*0.087*	»	9	*0.39*
	1899–1900	Gutach	Allemagne		122	64	1/3.97	4	*0.062*	1.35 1.20	14.38	*0.27*
Fr	1899–1900	Schwändeholzdobel	Allemagne		126	57	1/4	3.50	*0.061*	1	12.50	*0.28*
	1904–05	Krenngraben	Autriche		134	40	1/4	2.50	*0.062*	1.20	6.32	*0.39*
	1904–05	Steyrling	Autriche		137	70	1/4.45	3.25	*0.046*	1.25 à 1.45	10.96	*0.30*
	1904–05	Gratschacher Graben	Autriche		»	32	1/3.55	3	*0.094*	1.20	5.5	*0.54*
	1904–06	Salcano	Autriche		141	85	1/3.90	3.4 à 5	*0.058*	1.35 à 1.5	1.9	*0.26*
	1907–09	Langenbrand	Allemagne		152	59	1/4	3.90	*0.066*	1 à 1.35	13.2	*0.30*
	1907–09	Lichtensteig	Allemagne	III	161	42.82	1/3.71	3.50	*0.081*	1 à 1.25	11.5	*0.30*
	1910–11	Krummenau	Allemagne		164	63.26	1/4.57	3.50	*0.055*	1 à 1.2	10	*0.35*
	1904–06	Triège Finhaut	Suisse		»	35.40	1/3.64	3	*0.084*	1	8.40	*0.35*
fr	1909	Malavaux, sur le Rouillon	France		»	35	1/5.22	4	*0.113*	0.8	7	*0.57*

15 — Pour le sens des abreviations, voir Preliminaires, p. 3.

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos d'une grande voûte *(Suite)*.

Les voûtes articulées sont en italique.

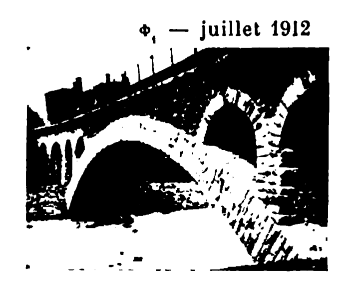
Voie portée [15]	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbai.t σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Piles: Épaisseur E'	Piles: Hauteur max. sous clef H'	Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
		Arcs très surbaissés A[1]									
rte	1885	*Höfen*	Allemagne	IV 41	28m (entre rotules)	1/10	1m40	*0.05*	0m70	2m60	*0.54*
rte	1899-1900	*Grasdorf*	Allemagne	IV 129	40.39 (entre rotules)	1/8.93	1.30, 1.40	*0.034*	0.60	3.50	*0.40*
rte	1903-04	*Göhren*	Allemagne	IV 139	60.56 (entre rotules)	1/8.89	2, 2.40 / 2.80	*0.046*	0.9-1	3.50	*0.80*
rte	1903-04	*Illerbeuren*	Allemagne	IV 159	57.16 (entre rotules)	1/5.82	2.35	*0.041*	0.7 à 0.8	8	*0.29*
aq	1885	Weisenbach	Allemagne	III -219	40	1/8					
Fr	1902-03	*Morbegno*	Italie	IV - 65	70	1/7	4.50	*0.064*	1.10	8	*0.56*

Ce qui s'évide le mieux, ce sont les reins d'une arche unique peu surbaissée. On n'évide pas que les ponts de luxe[16].

Art. 2. — Ponts à plusieurs grandes arches.

Intrados Voie portée	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie, Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaist σ	Évidements au-dessus des voûtes: Portée $2a'$	Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Piles: Épaisseur E'	Piles: Hauteur max. sous clef H'	Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
		Pleins Cintres Cn									
rte	1845	La Cadène, sur la Truyère	France	»	22m10	»	3m	*0.135*	0m80	5m74	*0.52*
rte	1864-66	Albi, sur le Tarn	France	»	27.60	»	4	*0.144*	1.05	7.58	*0.52*
rte	1895-97	Le Chambon, sur la Loire	France	»	28	»	2	*0.071*	0.80	5.40	*0.37*
rte	1890-1901 / 1904-1908	Avenue du Connecticut, à Washington	États-Unis	I - 67	45.72	»	4.27	*0.093*	0.91	13.50	*0.32*
rte	1901-02	Oued Dar-el-Oued	Algérie	»	25	»	2.50	*0.10*	»	»	»
rte	1904-07	Le Rozier, sur le Tarn	France	»	25	»	3	*0.120*	0.65	7	*0.43*
Fr	1889-92	Saint-Florent, sur le Cher	France	»	30	»	4.30	*0.143*	0.80	7.50	*0.57*
Fr	1890-92	Amélie-les-Bains, sur le Tech	France	»	26	»	2.62	*0.10*	0.70	6.60	*0.40*
fr	1908	Lantosque, sur la Vésubie	France	»	22	»	2.20	*0.10*	0.60	6.20	*0.35*
fr	1903-05	Gros-Vallon	France	»	22	»	2.20	*0.10*	0.60	6.35	*0.34*
		Ellipses En									
rte	1874-76	Courcelles-sur-Seine	France	»	33m	1/3.3	2.20	*0.067*	0.75	4.20	*0.52*
rte	1895-97	Verdun-sur-le-Doubs	France	I - 165	41	1/4.47	2.32	*0.056*	0.68	3.70	*0.62*
rte	1908-09	Le Creux, sur l'Aumance	France	»	16.30 / 15.70	1/3.26 / 1/3.20	1.60	*0.10*	0.50	4.20	*0.38*
rte	1910-13	Saint-Victor	France	»	23 / 21	1/3	2	*0.09*	0.50	4.13	*0.48*
					19		1.90	*0.10*	0.50	3.77	*0.50*
aq	1870-73	Pont-sur-Yonne	France	I - 213	40	1/5	1.10 à 1.23	*0.029*	0.27 à 0.35	5	*0.22 à 0.25*
Fr	1901-03	Big-Muddy River	États-Unis	I - 225	42.67	1/4.67	3.96	*0.093*	0.61	5	*0.79*

Φ_1 — juillet 1912



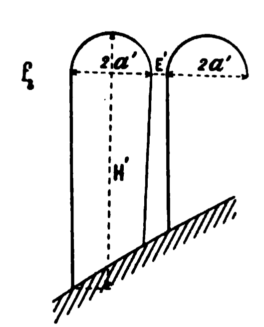
15. — Pour le sens des abréviations, voir Préliminaires, p. 3.

16. — On a évidé presque tous les ouvrages de la ligne qui descend de Bevers à Schuls (Engadine) (Φ_1).

Viaduc d'évidement en plein cintre sur le dos de grandes voûtes *(Suite)*

Les voûtes articulées sont en italique.

Voie portée	Dates	Ponts :	Pays	Pour les voûtes ⩾ 40m, voir la Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée $2a$	Grandes voûtes: Surbaisst σ	Évidements: Portée $2a'$	Évidements: Rapport $\frac{2a'}{2a}$	Piles: Épaisseur E'	Piles: Hauteur max. sous clef H'	Piles: Rapport $\frac{2a'}{H'}$
				Arcs assez surbaissés							
rte	1892-93	Vals-les-Bains	France	»	20m	1/6.66	1m408	*0.07*	0m45	2m48	*0.56*
rte	1901-02	Oued Amacin	Algérie	»	27	1/6	1.70	*0.063*	0.45	»	»
Fr	1904-06	Canale	Autriche	III-185	40	1/5	2.50	*0.061*	1.20	5	*0.50*
				Arcs très surbaissés							
rte	1900-04	Arciat	France	»	31	1/7.12	2.14	*0.069*	0.68	4	*0.53*
rte	1901-03	*Hochberg*	Allemagne	IV-177	40	1/7.41	1.40	*0.035*	0.60	2.23	*0.62*
rte	1901-05	*Moulins-lez-Metz*	Allemagne	IV-202	44.70 / 40.54	1/8 / 1/8.46	1.50	*0.033*	0.60	4.10	*0.36*
rte	1903-04	Mehring	Allemagne	III-252	46	1/7.45	2	*0.043*	0.70	4.50	*0.44*
rte	1905	Krappitz	Allemagne	III-265	50	1/8.33	1	*0.02*	1	3.40	*0.29*
rte	1905-06 / 1907-08	Schweich / Trittenheim	Allemagne	III-268 / III-276	46	1/7.45	2	*0.043*	0.70	4	*0.50*
rte	1908-09	Andrézieux	France	»	36.45 / 33.30	1/7.75 / 1/8.32	2	*0.054* / *0.060*	0.70 et 1	4.07	*0.49*



Art. 3. — Portée $2a'$ des voûtes d'évidement (f_3).

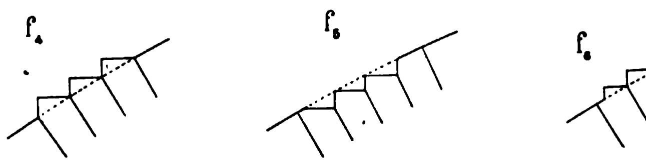
On règle la portée $2a'$ au mieux pour l'aspect, d'après la hauteur H'[17], un peu d'après l'ouverture des grandes arches $2a$[18] : on n'a pas dépassé 5m40[19].

A Luxembourg, les piles trop hautes ont été coupées par deux chapiteaux[20].

Quelquefois, on a fait varier avec la hauteur H' la portée $2a'$ et l'épaisseur E'[21], ou, pour ne pas avoir de poussées inégales, seulement l'épaisseur E'[22].

Art. 4. — Comment les voûtes d'évidement s'appuient sur les grandes.

— On reçoit les piles des voûtes d'évidement sur les voussoirs des grandes voûtes taillés en crossettes *dépassant l'extrados* (f_4).



On a quelquefois, fort à tort, soit creusé la grande voûte (f_5), soit découpé un angle rentrant dans une crossette (f_6).

On étudiera avec soin l'appareil des crossettes : il n'y faut ni angles rentrants, ni becs de flûte, ni délits.

17. — A des ponts à pente unique, $2a'$ n'est pas le même de chaque côté (Constantine, II, p. 107; Escot, II, p. 174 ; Ramounails, II, p. 186).

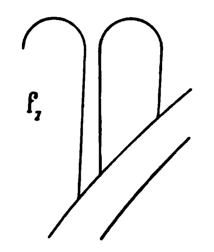
18. — On a donné, p. 51 à 54, les rapports $\frac{2a'}{H'}$, $\frac{2a'}{2a}$.

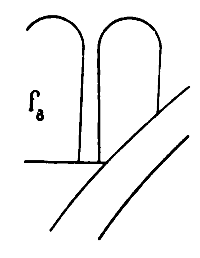
19. — Luxembourg (II, p. 67).

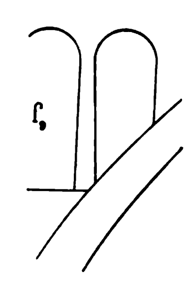
20. — II, p. 68', Pl$_8$, f_{11}.

21. Salcano (III, p. 141), Göhren (IV, p. 139).

22. — Wiesen (I, p. 235), Gutach (III, p. 122), Schwändeholzdobel (III, p. 126), Steyrling (III, p. 137), Langenbrand (III, p. 152), Lichtensteig (III, p. 161), Krummenau (III, p. 164), Illerbeuren (IV, p. 159).







Sur un extrados fuyant, il est difficile d'accrocher les piles (f_7) : on les reçoit plutôt sur le couronnement horizontal d'un mur (f_8)[23], (f_9)[24].

On a quelquefois, dans les grandes voûtes en béton, ancré de hautes piles en béton armé[25].

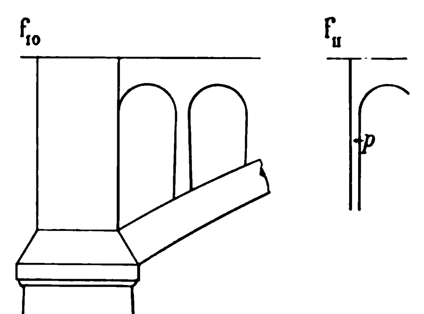
Dans la disposition des évidements, il faut un peu de goût : on en a quelquefois manqué (Φ_2, Φ_3).


Φ_2


Φ_3

Art. 5. — Ce qu'on met sur les piles des ponts à plusieurs arches.

— Un pilastre plein (f_{10})[26] couronne bien un avant-bec qui, autrement, ne porte rien.



Quelquefois on a, d'une arche à l'autre, continué le viaduc d'évidement[27] : dans ce cas, on se gardera d'appuyer une petite pile sur le milieu de la grande.

Art. 6. — Demi-piles le long des culées (p de f_{11}).

— On a presque toujours disposé une demi-pile p le long d'un pilastre ou d'une culée.

C'est une recherche inutile. Il y a des demi-piles à Lavaur et au Castelet : on les a supprimées à Luxembourg : c'est plus ferme.

§ 2. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT EN ARC DE CERCLE*

On a, quelquefois, évidé par des arcs[28].

Le dernier arc, le plus voisin de la clef, ne fait pas toujours bon effet.

S'il y a un pilastre au-dessus des piles, il faut au moins 3 petites voûtes de chaque côté. Deux font mal : une, c'est pis.

23. — Castelet (II, p. 130). 24. — Lavaur (II, p. 135).

25. — Walnut-Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95).

26. — Connecticut (I, p. 67), Big Muddy River (I, p. 225), Mehring (III, p. 252), Orléans (III, p. 255), Schweich (III, p. 268), Trittenheim (III, p. 276), Neckargartach (IV, p. 186), Maximilien (IV, p. 192), Moulins-lez-Metz (IV, 202).

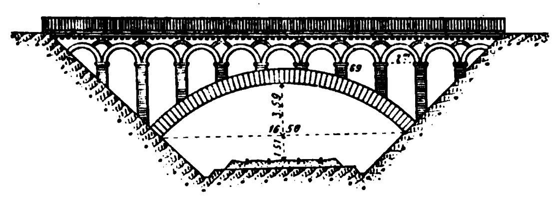
27. — Pont-sur-Yonne (I, p. 213), Verdun-sur-le-Doubs (I, p. 165), Canale (III, p. 185), Amélie-les-Bains, Arciat.....

28. — Passerelle de Boulainvilliers (Ligne de Paris-St-Lazare aux Invalides), Orléans (III, p. 255), Maximilien (IV, p. 192). A Orléans, on a armé les voûtes d'évidement.

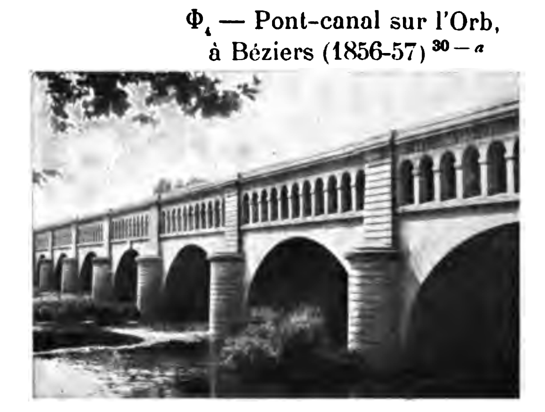
§ 3. — *VIADUC D'ÉVIDEMENT PASSANT PAR-DESSUS LA CLEF DES GRANDES VOÛTES*

Quelquefois, on a continué le viaduc d'évidement au-dessus de la clef [29] (f_{11}) : c'est évidemment plus cher.

f_{11} — Pont de Bressuire (1867-68) — 2mm



Φ_4 — Pont-canal sur l'Orb, à Béziers (1856-57) [30-a]



Des arches aveugles peuvent dissimuler agréablement la cuvette d'un pont-canal (Φ_4), et fort bien décorer un tympan [30bis].

§ 4. — *OUVRAGES A PLUSIEURS ARCHES : OUVERTURE UNIQUE AU-DESSUS DES PILES*

A quelques ponts, on a traversé le tympan au-dessus des piles par une ouverture unique, pour augmenter le débouché, quelquefois pour décorer l'ouvrage.

Elle est :

en plein cintre [31] (Φ_5) ;

en ogive [32] (Φ_6) ;

en ellipse : au pont des Amidonniers [33], pour l'aspect et le débouché ;

Φ_5 — Pont Fabricius, à Rome — (- 54) [30-b]



Φ_6 — Pont de Montauban — (XIVe) [30-c]





ronde, et simple motif de décoration [34, 35] : ce trou rond est de médiocre effet s'il est petit et encadré d'un maigre bandeau [35] ; au vieux pont de Toulouse (Φ_7),

29. — Big Muddy (I, p. 225). 30. — Dates des photographies : *a* - avril 1908 ; *b* - août 1908 ; c - juin 1902.
30bis. — Façades d'églises romanes.
31. — Ponts Fabricius et Emilius à Rome, — Pont d'Avignon, pont Saint-Esprit,....
32. — Pont de la jeune Fille (XIIe siècle, Perse). Annales des Ponts et Chaussées, juillet, 1883 « *Construction des Ponts en Perse* ». M. Dieulafoy. Pl. 19.
33. — I, p. 193. 34. — Pont d'Orléans (Ligne de Vierzon).
35. — Pont de l'Ile Verte sur l'Isère, près de Grenoble (1897-99) : œil de bœuf avec cadre appareillé.

l'« œil de pont » fait fort bien et augmente le débouché ;

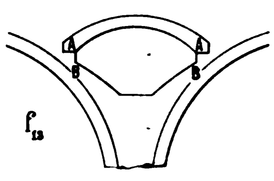
Φ_7 — Vieux Pont de Toulouse (1542-1632) [36-a]



en anneau elliptique à grand axe vertical [36 bis] : ce n'est point à imiter ;
en arc surbaissé : quand on élégit entre deux voûtes par un arc unique, il est bon de ménager un élément vertical AB (f_{11})[37,38] ; l'aspect est peu agréable quand l'arc retombe sur l'extrados [39,40] : à des ponts bas, cet évidement fait bien[41], moins bien au-dessus de hautes piles[37].

Φ_8 [36-b]





Φ_9



36. — Date des photographies : *a* - septembre 1903 ; *b* - août 1907.

36 bis. — Ponts des Échavannes à Chalon-sur-Saône, 1781-90, (Φ_8) (Gauthey), de Garching (IV, p. 95).

37. — Viaduc de Morez, 1909-11 (Ligne de Morez à Saint-Claude), - pleins cintres de 20m, arcs d'évidement de 8m.

38. — Viaduc de Fontpédrouse, pleins cintres de 17m, arcs d'évidement de 5m80 (Voir Titre XI).

39. — Pont de Plessis-lez-Tours (Ligne de Tours à Vendôme) (1855-57), anses de panier de 24m, arcs d'évidement de 7m.

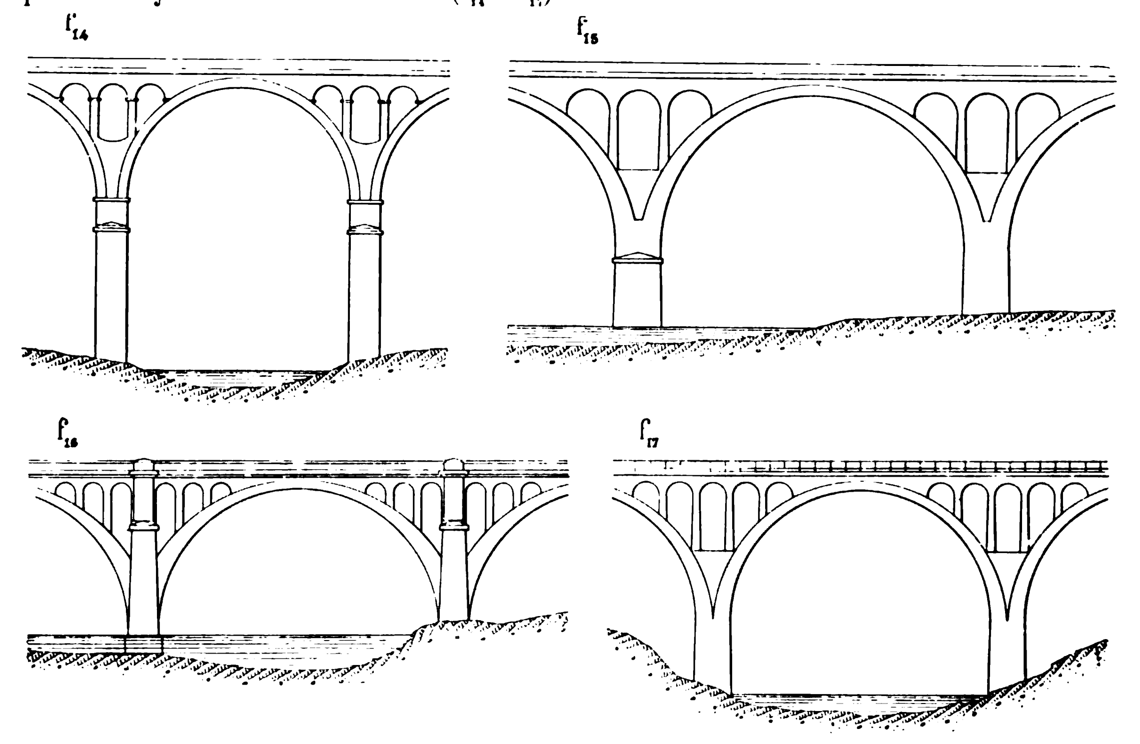
40. — Les deux viaducs de Saint-Chamas (Φ_9) et de la Cadière (Ligne d'Avignon à Marseille, 1847) ont été ainsi évidés : on a fendu un viaduc en plein cintre par le plan vertical de son axe et fait avancer l'une des moitiés, par rapport à l'autre, de la demi-ouverture. — C'est cher et laid. — Fort heureusement, ces ouvrages saugrenus n'ont pas été imités

41. — Amidonniers (I, p. 193).

§ 5. — *CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE*

On ne réussit guère à évider agréablement :

les ponts en plein cintre à plusieurs grandes arches : plus ils sont hauts, plus mal y font les évidements (f_{14} à f_{17})[41 bis].



ni les arcs très surbaissés :

ni les ponts biais : droites ou biaises, les voûtes d'évidement y font très mal, et il est malaisé de les accrocher sur les grandes.

Il ne faut pas que les voûtes d'évidement ou leurs piles retombent sur un extrados trop fuyant : c'est laid et les piles s'y accrochent mal.

Φ_{10} — Pont de la Goule-Noire (1871)[43]



Il n'est pas toujours bon de prolonger sur la culée un viaduc d'évidement ; il conviendra souvent de le faire buter contre des culées pleines.

Il n'est point facile de réussir un évidement unique au-dessus d'une pile : on en a fait de fort laids.

On n'acceptera pas volontiers un arc unique de part et d'autre d'une grande voûte[42] ; encore moins un arc soutenant la culée par la voûte (Φ_{10}).

41 bis. — Silhouettes de 4 ponts existants.
42. — Berdoulet (II, p. 128). Passage supérieur de Camperiès (ligne de Quillan à Rivesaltes).
43. — Route de Villars-de-Lans aux Baraques (Isère) — Date de la photographie : juillet 1908.

§ 6. — *FORME DES GRANDES VOÛTES SOUS DES ARCHES D'ÉVIDEMENT TRANSVERSALES*

Les appuis des évidements transversaux pressent sur une tranche de voûte parallèle aux génératrices, et appellent vers l'extrados la courbe de pression.

Il peut convenir de cambrer l'intrados et l'extrados pour bien l'encadrer et répartir au mieux les efforts, — surtout si l'on évide par une voûte unique qui concentre les charges [44].

CHAPITRE V

ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX

Art. 1. — Avec voûtes [45]. — On trouvera à l'APPENDICE ce qui concerne les voûtes d'évidement longitudinales des viaducs.

On les a adoptées plutôt sur les voûtes moyennes [46, 47] que sur les très grandes : elles ont moins d'appareil, moins de parement.

Sur 153 ponts à voûtes de 40^m et plus, 12 seulement sont ainsi évidés [48].

Sur des arches de grande montée, on a posé plusieurs étages de voûtes [49].

Pour qu'elles pèsent moins, on peut faire en briques voûtes et cloisons.

Elles sont en plein cintre [48], en arc [48], mieux, en ogive [48, 50], en ellipse surhaussée, pour moins pousser les tympans.

Toutes poussent les tympans, d'autant plus que plus grandes, plus surbaissées.

44. — Au viaduc de Nérard (Ligne de Saint-Germain-des-Fossés à Roanne), des arceaux ont repoussé à l'intérieur, de 0^{m}02 environ, leurs appuis sur les grandes voûtes.
Croizette-Desnoyers, *Construction des Ponts*, Tome II, p. 84.

45. — Il y a des évidements longitudinaux au pont Rouge (milieu du XIe siècle), au pont de la Jeune Fille (milieu du XIIe siècle). Loc. cit. renvoi 32, p. 26, Pl. 18, fig. 3 ; p. 38, Pl. 19, fig. 3.

46. — C'est le mode d'évidement ordinaire des ouvrages de Morandière et de ses élèves : Ponts de Chalonnes, de Nantes (ellipses de 30^m) ; viaducs de Port-Launay (22^m), de Pompadour (25^m), du Blanc (20^m),.......

47. — Voir APPENDICE, Viaducs.

48. — VOUTES D'ÉVIDEMENT LONGITUDINALES AU-DESSUS DE VOUTES ⩾ 40^m :

Les voûtes articulées sont en italique.

	Dates	Ponts	Voir Monographie Tome, p.	Grandes voûtes		Evidements		Epaisseur des murs	
				Portée	Surbaiss^t	Nombre	Portée	de tête	inter-médiaire
en plein cintre	1840-44	Nydeck *(Suisse)*.	II-51	45^{m}90	1/2.51	3	»	»	»
	1855-56	Nogent-sur-Marne (France)	I-79	50	»	5 (4 ét^{ges})	0^{m}80, 0^{m}95, 1^{m}20	0^{m}90	0^{m}60
	1860-61	St-Sauveur (France)	I-27	42	»	2	»	»	»
	1869-73	Collonges (France)	I-31	40	»	1	4	1.50	»
	1881-82	Oloron (France)	I-45	40	»	3 – 2	1.50 – 1.65	»	0.90
	1882	Teinach *(Allemagne)*	III-203	33 (retombées)	1/10	3	1	0.80	0.50
	1895-96	*Coulouvrenière (Suisse)*.	IV-81	40	1/7.11	9 (3 ét^{ges})	1.40	1.25	0.45
en arc	1854-55	Alma *(France)*.	I-153	43	1/5	7	2.12 à 2.95	1.00	0.35
	1896-97	Bellefield *(Etats-Unis)*.	III-49	45.72	1/4.10	7	2.21 et 2.59	1.68	0.69
	1901-03	Edouard VII *(Angleterre*	I-182	40.537	1/5.43	11	»	»	»
	1903-05	Plauen *(Allemagne)*.	III-52	90	1/5	6	4 de 1.50 2 de 1.80	2.20	0.40
en ogive	1833-34	Chester *(Angleterre)*.	III-29	60.959	1/4.76	4 2 étages	»	»	»

49. — Nogent-sur-Marne (I, p. 80) : 4 étages superposés.

50. — Luxembourg (II, p. 68^{4v}, f_6), au-dessus des voûtes de 21^{m}60.

On les a, quelquefois, tenues avec des tirants de métal. Ils ne sont pas à conseiller : ils ne se dilatent ni ne se contractent de ce qu'il faudrait. Si on en met, il faut les bien noyer dans la maçonnerie, pour qu'ils en aient la température.

Il convient d'aérer par des soupiraux, des jours, les évidements cachés, — les maçonneries se conservent mal dans l'air humide, — et de les visiter. On ménage à cet effet, dans les trottoirs ou l'entrevoie, des regards (trous d'homme) permettant d'y descendre ; on ouvre des passages dans les pieds-droits.

Art. 2. — Dalles sur murs longitudinaux.

— Presque tous les ponts anglais sont ainsi évidés [51].

Il n'y a pas de poussée sur les tympans.

Art. 3. — Plate-forme en béton ou métallique sur murs longitudinaux.

— On a ainsi évidé quelques ponts allemands [52].

Art. 4. — Répartition des efforts dans les grandes voûtes sous évidements longitudinaux.

— Entre les pieds-droits des voûtes longitudinales ou des dalles, les grandes voûtes ne portent rien : les charges y sont mal réparties [53].

51. ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX SOUS DALLES AU-DESSUS DE VOÛTES ⩾ 40m :

Dates	Ponts :		Pour les voûtes ⩾ 40m voir Monographie, Tome , p.	Grandes voûtes		Évidements		Epaisseur des murs	
				Portée	Surbaissement	Nombre	Portée	de tête	intermédiaires
1824-31	Londres	Angleterre	I-147	46m33	1/4.02	8	»	»	»
1826-27	Gloucester		I-107	45.72	1/4.29	5	»	1m07	0m61
1836-38	Victoria		II-201	48.77 43.89	1/2.22 »	4	»	»	»
1846-48	Ballochmyle		I-41	55.168	»	5	0m91	0.76	0.61
1882-83	Putney		III-239	43.891	1/7.46	8	1.06 et 1.07	»	0.57
1891-92	Wheeling (Etats-Unis)		III-47	48.463	1/5.612	9	0.86 et 0.89	0.91	0.61

52. ÉVIDEMENTS LONGITUDINAUX SOUS PLATE-FORME :

Les voûtes articulées sont en italiques.

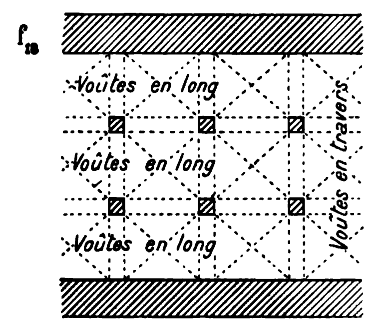
Plate-forme	Dates	Ponts : *Tous sont en Allemagne*	Voir Monographie, Tome , p.	Grandes voûtes		Évidements		Épaisseur des murs	
				Portée	Surbaissement	Nombre	Portée	de tête	intermédiaires
en béton	1886-87	*Marbach*	IV-45	32m entre rotules	1/10.32	3	1m00	0m80	0m50
	1889	*Baiersbronn*	IV-48	33 entre rotules	1/10	3	1.07	0.80	0.50
	1893	*Munderkingen*	IV-55	50 entre rotules	1/10	4 (4 étages)	0.90	1.00	0.60
métallique	1904	Wengern	III-207	50	1/9.10	2	1.90	0.60	0.50

53. — Viaduc à deux étages du Point du Jour à Paris : dans la région centrale de l'étage inférieur qui porte le viaduc de Ceinture, on a augmenté l'épaisseur des voûtes.

CHAPITRE VI

EVIDEMENTS DANS LES DEUX SENS

Traversons par des évidements transversaux des évidements longitudinaux. On n'aura plus que des voûtes sur arcades [54], des voûtes d'arête [55] (f_{18}) ou une plate-forme sur des piliers [56]. On ne peut pas élégir plus : on fera ainsi quand il faut réduire le poids sur l'arche, ou le poids total sur les fondations.



Toute la charge est concentrée sous les piliers.

Sur 153 ponts ayant des voûtes de 40ᵐ et plus, on en a ainsi évidé 15 : 7 à évidements cachés, 8 à évidements apparents [55, 56].

54. — Pont des Andelys, sur la Seine (1872-73). Ellipses de 34ᵐ à 1/3.86. 2 voûtes longitudinales de 1ᵐ35 ; murs de tête de 1ᵐ27 et intermédiaire de 1ᵐ, traversés, au-dessous des naissances, par 5 voûtes de 2ᵐ10, sur piles de 0ᵐ70.
Pont du Saulnier (III, p. 40).

55, 56. ÉVIDEMENTS DANS LES DEUX SENS AU-DESSUS DE VOÛTES ⩾ 40ᵐ:

Les voûtes articulées sont en italique.

	Voûtes ou plate-forme et piliers en :	Dates	Ponts : *Tous sont sous route*	Voir Monographie Tome, p.	Grandes voûtes: Portée	Grandes voûtes: Surbaissement	Portée des évidemᵗˢ: en long	Portée des évidemᵗˢ: en travers	Épaisseur: de la plate-forme	Épaisseur des piliers: en long	Épaisseur des piliers: en travers
			1° Évidements cachés								
55.	Maçonnerie	1873-74	Claix * (France)	III-36	52ᵐ	1/6.46	1ᵐ50	1ᵐ50	»	0ᵐ80	0ᵐ80
56.	Béton	1900-01	*Prince-Régent* (Allemagne)	IV 239	63 (entre rotules)	1/9.69	1.48	»	0.25	0.52**	0.52**
		1901-02	*Max-Joseph*	242	60	1/10	2.53 à 3ᵐ	2.20	0.40	0.90	0.70
		1902-03	*Reichenbach*	183	41	1/10	»	1.00	0.25	»	0.50
		1904-05	*Wittelsbach*	199	41	1/10	1.00	1.50	0.25	0.50	0.50
	Béton armé	1905-08	*Mannheim*	206	58.5	1/10.6	»	»	»	»	»
		1908-09	Edmondson-Avenue, à Baltimore (Etats-Unis)	I-206	42.367	1/3.17	2.44	2.01	»	0.46	0.46
			2° Évidements apparents								
	Maçonnerie	1903-05	*Maximilien* (Allemagne)	IV 192	44 (entre rotules)	1/8.98	2.10 à 2.65	1.70	0.40	0.90	0.80
	Béton	1895	*Inzigkofen*	225	43	1/9.81	1.15 et 1.20	0.68	0.30	0.60	0.70
		1899-1900	*Neckarhausen*	232	50	1/11	1.07, 1.20 1.34	0.73	0.32	0.52	0.60
		1903-05	*Neckargartach*	186	40	1/9.14	»	1.30	0.35	0.60	0.60
	Béton armé	1904-05	*Wallstrasse*	143	57	1/9.83	2.55	1.26 et 1.36	0.16	0.3, 0.45	0.3, 0.5
		1908-11	Seythenex (France)	III-177	41.19	1/4.10	2.22 (2 étᵍᵉˢ)	2.40	0.12	0.25	0.20
		1909-11	Longuich (Allemagne)	III-279	46	1/7.46	2.30	1.45	0.20	0.40	0.40
		1911-12	*Gräveneck* (Allemagne)	IV-213	48.425	1/6.25	2.35	1.29	0.15	0.25, 0.3	0.25

* Tirants entre tympans. ** Piliers en maçonnerie.

CHAPITRE VII

EMPLOI DU BÉTON ARMÉ [57]

Il est simple et pratique de placer la chaussée sur un hourdis en béton armé, porté par des murs [58] ou des piliers apparents ou cachés [57].

Le hourdis est léger, ne pousse pas les murs de tympans, se prête bien aux encorbellements.

On y ménage facilement des joints de dilatation, utiles sur les grandes voûtes plates, nécessaires sur les voûtes articulées.

Quand on emploie le béton armé, il faut adopter des plates-bandes [59], et renoncer à rappeler des voûtes [58].

Φ_{11} — Passage supérieur de la gare de Port-de-Bouc — avril 1914



57. — Voir renvoi 56.

58. — Guggersbach III, p. 59.

59. — Sur la ligne de Miramas à l'Estaque, nous avons construit deux passages supérieurs de 25^{m}60 (Φ_{11}) et 36^{m}30 (arcs en béton non armé à 3 articulations en pierre, tympans et tablier en béton armé). (Voir tableau, p. 25 - *A*).

TITRE VII

COMMENT ON RÉDUIT LA LARGEUR DES VOÛTES ENTRE TÊTES

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT PLANCHER SUR DEUX ANNEAUX MINCES

CHAPITRE I

POUR ÉPUISER LA RÉSISTANCE DES VOÛTES, IL FAUT EN RÉDUIRE LA LARGEUR

§ 1. — *DANS UN GRAND PONT EN PIERRE, AVEC LES DISPOSITIONS HABITUELLES, LES MATÉRIAUX NE TRAVAILLENT GUÈRE QU'A SE PORTER EUX-MÊMES, ET ILS NE TRAVAILLENT PAS ASSEZ*

Art. 1. — Conditions à réaliser pour réduire au minimum le cube des matériaux d'un grand pont en pierre.

Un pont est uniquement fait pour les surcharges mobiles, — véhicules et piétons, — qui passeront dessus. Il ne travaille utilement que du fait de ces surcharges. Il faut donc que le travail de ses matériaux soit produit surtout par elles, et non par le poids mort.

Il faut, ensuite, qu'en chaque point ce travail total soit le maximum que permettent la résistance des pierres à l'écrasement, leur préparation (c'est-à-dire la taille des lits et joints), le mortier employé (chaux ou ciment).

Or, dans les grands ponts en pierre, on ne peut remplir ni l'une ni l'autre de ces deux conditions.

Art. 2. — Les charges roulantes comptent peu dans le travail total des maçonneries d'un grand ouvrage en pierre. — Dans l'effort total qu'on demande à la maçonnerie, ces charges, *en vue desquelles, encore une fois, le pont est uniquement fait,* comptent très peu [1].

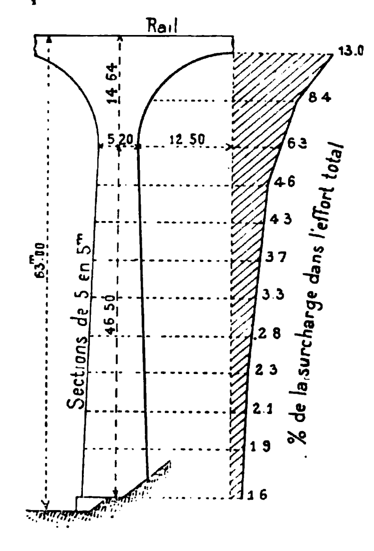
1. — Voici, pour divers ouvrages, leur part dans le travail total des maçonneries :

	Portée	Surbaissement	Part °/o de la surcharge roulante * dans l'effort total					
			Ponts-route 0m35 à 0m45 d'épaisseur au-dessus de la clef. Surcharge roulante de 400k par mq.			Ponts de chemin de fer 0m95 à 1m d'épaisseur sur la clef. Surcharge roulante de 1.000 à 1.100 k. par mètre carré.		
			à la clef	au plan horizontal des naissances	sur le sol de fondation (sous une pile)	à la clef	au plan horizontal des naissances	sur le sol de fondation (sous une pile)
Viaducs en plein cintre	5m	1/2	14 °/o	10 °/o	4 °/o	23 °/o	17 °/o	9 °/o
	20m	1/2	8	4	1,5	16	8	3
	25m	1/2	6	3	1	13	6	1,6
Ponts en ellipse	20m	1/4	9,5	4,5	2,5	21	12	5,3
	36m	1/3,6	6	3,4	2	13	7,5	4,6
	41m	1/4,5	7	5	4	14,5	11	8
	46m	1/4,2	6	4	3	14	11	8
Ponts en arc	16m8	1/6	9	8	4	17	13	8
	31m	1/7	9	8	4	16	14	9
	40m	1/8	7	5	3	13	10	7
	61m5	1/2,24	»	»	»	12	»	1,8 sous la culée

* Dans tous ces ouvrages, on n'a pas appliqué les mêmes règles pour la détermination des épaisseurs ; les profondeurs de fondation et les densités des matériaux sont fort inégales. Ils ne sont pas rigoureusement comparables.

Leur part °/₀ dans le travail total est sensiblement moindre dans un pont-route que dans un pont de chemin de fer.

f_1 – Viaduc de la Crueize [2] – 1mm



La part d'une même surcharge est d'autant plus faible qu'il y a plus de maçonnerie intéressée : dans un ouvrage, elle va donc en diminuant de la clef aux fondations, à mesure qu'on s'abaisse sous la plate-forme (f_1).

Pour une même portée, elle est plus grande dans une voûte plate que dans un plein cintre qui a plus de maçonnerie pour une même projection horizontale.

Pour deux ouvrages semblables, elle diminue avec la portée.

Dans tous les cas, elle compte très peu dans le travail total, c'est-à-dire que *dans un grand ouvrage en pierre, les voûtes, les piles, ne travaillent guère qu'à se porter elles-mêmes, et les maçonneries en sont d'autant plus mal utilisées que la portée et la hauteur sont plus grandes.*

§ 2. — *AVEC LES DISPOSITIONS USUELLES, ON NE PEUT PAS IMPOSER AUX GRANDES VOÛTES TOUT L'EFFORT QU'ELLES PEUVENT SUPPORTER. — IL FAUT RÉDUIRE LEUR LARGEUR*

En réduisant les épaisseurs, on n'augmente pas à son gré les pressions dans les voûtes [3].

Le travail n'y dépasse 40k que dans les très grandes voûtes [4] : il est de 69k à Plauen (arc de 90m au 1/5), dans les conditions les plus défavorables de surcharge et de température [5].

Ainsi donc, avec les épaisseurs pratiques, et sauf les cas de portée et surbaissement exceptionnels, on ne peut pas faire travailler une bonne voûte aux 70k, 80k qu'elle peut supporter [6].

Pour y arriver, il faut la charger, c'est-à-dire en réduire la largeur :

soit en faisant déborder les trottoirs sur une voûte unique de largeur réduite ;

soit en plaçant la voie sur un plancher porté par deux minces anneaux.

2. — Ligne de Marvejols à Neussargues. 3. — Tome III, p. 341.

4. — 50k à Montanges (arc de 80m29 au 1/4) (III, p. 62) ; 51k à Salcano (arc de 85m à 1/3,9) (III, p. 141) ; 56k à Morbegno (arc de 70m à 1/7) (IV, p. 65) ; 83k dans un plein cintre de 157m (M. Résal, *Ponts en maçonnerie*, Tome I, p. 224).

5. — III, p. 54. 6. — Titre I, p. 22. Art. 3.

CHAPITRE II

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT

§ 1. — *CE QUI A ÉTÉ FAIT SUR LES VOÛTES DE 40m ET PLUS*

Types d'encorbellement		Dates	Ponts [7]	Voir Monographie Tome,... p.	Largeur entre parapets $\mathcal{L}$	Largeur entre tympans l	Economie de largeur $\mathcal{L} - l$	Encorbellement de chaque côté $\frac{\mathcal{L} - l}{2}$	Parapets en :
Ponts-route									
Plinthe en saillie		1895	Inzigkofen	IV, 225	3m80	3m60	0m20	0m10	Métal
		1903-05	Maximilien	IV, 192	22.00	21.80	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
Plinthe sur sous-plinthe		1886	Elyria (2 sous-plinthes,	III, 46	7.925	6.096	1.829	0.914	
		1903-04	Mehring	III, 252	6.50	6.30	0.20	0.10	Métal
		1905-06	Schweich	III. 268	7.00	6.60	0.40	0.20	
		1907-08	Trittenheim	III, 276	6.50	6.10	0.40	0.20	
Corbeaux ou Consoles	en pierre de taille	1860-61	St-Sauveur	I, 27	6.20	4.90	1.30	0.65	
		1882	Teinach	III, 203	6.20	5.60	0.60	0.30	
		1885	Höfen	IV, 41	3.90	3.40	0.50	0.25	Métal
		1886-87	Marbach	IV, 45	6.20	5.60	0.60	0.30	
		1889	Baiersbronn	IV, 48	6.60	5.81	0.79	0.395	
		1889	Huzenbach	III, 206	3.80	3.00	0.80	0.40	
		1900-01	Prince-Régent	IV, 239	17.20	17.00	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
		1902-04	Londres	I, 147	19.82	17.07	2.75	1.375	
		1903-05	Plauen	III, 52	17.00	16.00	1.00	0.50	Métal
		1903-05	Neckargartach	IV, 186	10.80	10.40	0.40	0.20	Pierre de taille
		1906-07	Elise	IV, 151	8.90	8.70	0.20	0.10	Pierre de taille ajourée
		1908-09	Montanges	III, 62	6.20	5.45	0.75	0.375	Métal
	en béton	1893	Munderkingen	IV, 55	8.00	7.40	0.60	0.30	
		1899-1900	Brent	I, 34	8.20	7.25	0.95	0.475	
		1899-1901	Malling	IV, 175	6.00	5.72	0.28	0.14	Métal
		1899-1908	Connecticut	I, 67	15.545	»		»	
		1899-1900	Neckarhausen	IV, 232	5.50	4.80	0.70	0.35	
	en béton armé	1904-05	Wallstrasse	IV, 143	10.00	8.80	1.20	0.60	Béton armé
		»	Gross-Kunzendorf	III, 267	8.30	7.20	1.10	0.55	
		1906	Guggersbach	III, 59	5.00	3.90	1.10	0.55	
		1907	Schwusen	III, 213	5.00	4.60	0.40	0.20	Métal
		1908	Seythenex	III, 177	3.80	2.80	1.00	0.50	
		1909-11	Longuich	III, 279	4.60	4.10	0.50	0.25	
		1911-12	Gräveneck	IV, 213	5.70	5.00	0.70	0.35	
Plate-forme en métal posée sur les tympans		1904	Wengern	III, 207	7.00	5.50	1.50	0.75	Métal
Ponts sous chemin de fer									
Plinthe sur sous-plinthe		1890	Pouch	III, 110	8.90	8.30	0.60	0.30	Métal
		1890-91	Freyssinet	III, 112	8.25	7.65	0.60	0.30	
Modillons		1877-78	Calcio	III, 100	8.00	7.50	0.50	0.25	
Corbeaux ou Consoles	en pierre de taille	1871-72	Signac	I, 131	4.50	4.20	0.30	0.15	
		1899-1900	Gutach	III, 122	5.00	4.20	0.80	0.40	
		1899-1900	Schwändeholzdobel	III, 126	5.20	4.40	0.80	0.40	
		1901-02	Solis	I, 55	4.00	3.70	0.30	0.15	
		1904-05	Schalchgraben	II, 168	5.00	4.50	0.50	0.25	
		1904-05	Steyrling	III, 137	4.75	4.50	0.25	0.125	
		1907-08	Escot	II, 174		3.87			
		1907-09	Langenbrand	III, 152	4.70	4.20	0.50	0.25	
	en béton	1903-04	Illerbeuren	IV, 159	4.60	4.00	0.60	0.30	
		1906	Kempten Pout à 4 voies	IV, 115	16.75	16.00	0.75	0.375	
			Kempten Pout à 2 voies		8.25	7.50	0.75	0.375	
		1907-08	Garching	IV, 95	4.60	3.80	0.80	0.40	
		1907-09	Wiesen	I, 235	4.00	3.70	0.30	0.15	
	en métal	1905-06	Verdon	I, 133	5.58	4.85	0.73	1 passerelle en encorbt de 0.855	
Plate-forme en métal posée sur les tympans		1901-02	Chemnitz	III, 129	»	2.70			

7. — Voir aussi les ponts en béton un peu armé de Spokane, III, p. 293, Boberullersdorf, III, p. 298.

§ 2. — *QUELQUES TYPES D'ENCORBELLEMENTS*

Jusqu'ici, on a pratiqué les encorbellements surtout pour élargir les anciens ponts [8].

Ils sont fort à conseiller dans les ponts neufs pour supporter les trottoirs [9] où ne passent que des piétons.

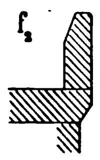
On gagne beaucoup et on couronne agréablement un pont par de grands corbeaux en pierre de taille portant des dalles [10], des voûtes en briques [11] (Φ_1).

Φ_1 — Hôtel d'Assezat à Toulouse (XVIe siècle) — octobre 1911



Le béton armé, hourdis et grandes consoles, est là très spécialement indiqué [12, 13].

Sauf dans les ponts de ville, où ont paru parfois s'imposer des parapets en pierre, on ne met en encorbellement que des garde-corps en métal, plus légers, plus minces. Ils gagnent déjà 30 à 35cm sur la largeur du pont [14].

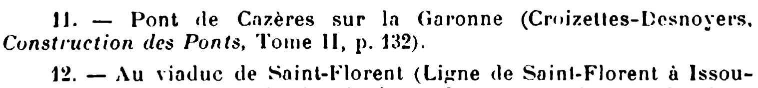


8. — Pont de Jurançon sur le Gave de Pau (Φ_8, p. 109),...

9. — A un pont d'Andrinople, le parapet s'appuie sur une corniche en surplomb ; il est, pour moins encombrer, taillé en biseau (f_2) (Choisy, *Histoire de l'Architecture*, Tome II, p. 132).

10. — Pont de Londres, I, p. 150, 151 ; — Arènes d'Arles (f_3) (Choisy, *Art de bâtir chez les Romains*, Pl. XVI, fig. 3) ; — Murs latéraux des églises romanes d'Auvergne,...

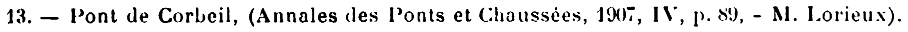
f_3



11. — Pont de Cazères sur la Garonne (Croizettes-Desnoyers, *Construction des Ponts*, Tome II, p. 132).

12. — Au viaduc de Saint-Florent (Ligne de Saint-Florent à Issoudun), on a posé une voie de chemin de fer départemental à côté des deux voies normales, en mettant les parapets en porte-à-faux de 1m38, sur des consoles en béton armé ancrées dans les tympans (1907).

Pour pouvoir installer une nouvelle voie sur le pont sur l'Isle, en gare de Coutras, on a mis le garde-corps en encorbellement de 2m25, sur consoles en béton armé, et placé le rail extérieur à 10cm en arrière du tympan (1908).



13. — Pont de Corbeil, (Annales des Ponts et Chaussées, 1907, IV, p. 89, - M. Lorieux).

14. — Appendice, - Viaducs.

Il ne faut pas avoir peur des encorbellements : il y en a de célèbres exemples [15].

§ 3. — *RÉDUCTION DE LARGEUR POUR LES VOÛTES SOUS RAILS*

On a réduit la largeur des grandes voûtes :

sous une voie normale : à 3^m80 [16, 17] au lieu de 4^m50 ;

sous deux voies normales : à 7^m50 [18] au lieu de 8^m ;

sous une voie étroite : à 3^m70 [19] au lieu de 4^m.

Au pont de Fontpédrouse [20], on a obtenu la largeur de 4^m14 en plaçant une dalle en béton armé sur des voûtes larges, au sommet, de 2^m50 seulement.

Plus l'ouvrage est haut, plus on gagne de cube [21].

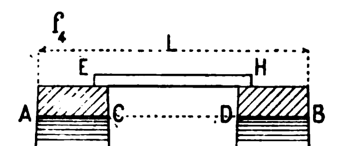
CHAPITRE III

VOIE LARGE SUR DEUX ANNEAUX MINCES PORTANT UN PLANCHER

§ 1. — *DESCRIPTION SOMMAIRE*

Art. 1. — Principe du système. — Soit à établir un ouvrage d'une largeur L (f_4).

Au lieu d'une voûte continue AB, construisons deux ouvrages indépendants AC, DB, et jetons sur le vide CD, un plancher EH en béton armé, en métal [22, 23].



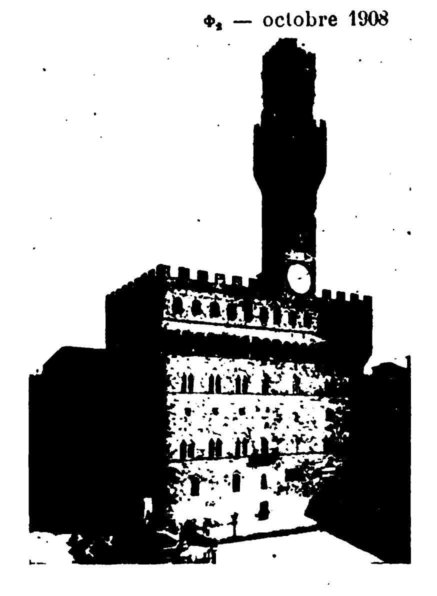
Art. 2. — Son économie. — Nous réalisons ainsi les deux conditions pour réduire au minimum le cube des matériaux de l'ouvrage (Chap. I, - Art. 1), conditions irréalisables avec la voûte pleine AB :

on augmente très sensiblement la part % de la surcharge dans le travail total ;

en concentrant les charges sur les voûtes de largeur réduite AC, BD, on y augmente, à volonté, le travail par unité.

Une charge au milieu est portée, non par un anneau de voûte de grande ouverture, mais par un plancher léger de petite portée.

Φ_4 — octobre 1908



15. — Au Vieux Palais de Florence (Φ_4), sur les corbeaux du couronnement, s'élève une tour dont le couronnement est aussi sur corbeaux.

16. — Garching (IV, p. 95).

17. — Le pont de Chemnitz (III, p. 129) aurait 2^m70 entre têtes pour une seule voie normale.

18. — Calcio (III, p. 100), Kempten (IV, p. 115).

19. — Solis (I, p. 55), Wiesen (I, p. 235).

20. — Voir plus loin, Titre XI.

21. — APPENDICE, - Viaducs,

22. — Cela revient, au fond, à traiter un pont comme une maison. Pour une maison, on construit d'abord les gros murs : on les fonde avec soin, on y met les matériaux chers. On y ménage les fenêtres, les portes : ce sont les deux ponts jumeaux avec leurs grandes voûtes et leurs voûtes d'évidement. Puis, on les couvre d'un plancher léger calculé pour les surcharges qu'il peut avoir à supporter, qu'on peut remplacer par parties, par feuilles. C'est le plancher en béton armé, en poutrelles avec briques,...

23. — C'est, comme dans les voûtes « gothiques », une coque légère sur deux nervures.

Le plancher transporte toutes les charges verticales sur les anneaux de tête; ceux-ci les transforment en poussées et les conduisent aux culées extrêmes qui les absorbent. Les poussées ne sont plus dispersées sur toute la largeur du pont : elles sont concentrées sur celle des anneaux [24].

On supprime tous les matériaux mal utilisés de l'intervalle CD ; on les remplace par un plancher qui, lui, travaille partout au maximum permis. On supprime, en particulier, les matériaux de voûte, qui sont chers.

On supprime le cintre, dont le prix augmente avec le carré de la portée.

Art. 3. — Avantages divers. — Les deux ouvrages, étant indépendants, peuvent être fondés à des niveaux fort différents, avantage sensible si le rocher se rencontre ainsi, — tandis que, pour une grande arche unique, il faut un appui continu, sans ressaut [25].

S'il y a des mouvements inégaux à chaque tête (tassement, dilatation), pas de tendance à fissures, les voûtes étant indépendantes.

La deuxième voûte peut être faite sur le cintre de la première, transporté ou réemployé [26] : on a très facilement ripé de très grands cintres.

La première voûte sert de pont de service pour la deuxième.

Dans l'intervalle entre les deux voûtes, on fera, si l'aspect ne le défend pas, passer l'égout, les conduites d'eau, de gaz, les fils de télégraphe, de téléphone.

Il n'y a en béton armé, en métal,... que le plancher qui, seul, travaille à la flexion, partie accessoire, facile à réparer.

Les autres parties, qui, toutes, travaillent à la compression, — les essentielles : fondations, piles, culées, voûtes, — sont en maçonnerie.

24. — De même, tandis que sur toute leur longueur, les voûtes romanes poussent un mur plein, les nervures « gothiques », dégagées de la masse de la voûte, localisent la poussée sur les arcs-boutants.

25. — Au pont de Pont-Sainte-Maxence, sur l'Oise (1771-86), Perronet posa 3 arcs de 23m40 surbaissés à 1/11,2 sur 2 piles faites chacune de 2 groupes de 2 colonnes (Φ_3, f_5), de 2m92 de diamètre, écartés de 2m92. C'était hardi ; ç'a été solide : le 1er avril 1814, on fit sauter la première voûte rive gauche : il n'en resta qu'un arc de 2m40 de largeur ; les deux autres arches restèrent debout.

Pont de Pont-Sainte-Maxence.

Φ_3 — avril 1914 (un siècle après l'explosion)

f_5 - Coupe horizontale des piles - 2mm



Pont de la Concorde.

Coupe horizontale des piles - 2mm

f_6 - projetée f_7 - exécutée

Perronet, plus tard (il avait alors près de 80 ans), voulait faire de même à Paris, près de l'admirable place Louis XV (Concorde) (f_6).
On le trouva déjà trop célèbre...: on rejeta le projet.

26. — Peut-être a-t-on ainsi construit le pont du Gard qui est en arceaux accolés.

PONTS EN DEUX ANNEAUX [28, 29] Pour le sens des symboles **A**, **E**, r^{te}, f^r, voir Préliminaires, p. 3.	Largeur entre parapets $\mathcal{L}$	Largeur des anneaux à la clef l_a	Largeur du vide entre eux l_v	Intrados aux fondations ou aux naissances : Portée $2a$ Surbaissement	Intrados Portée libre $2a'$	Épaisseur de la voûte à la clef *aux retombées*	Rapports % $\frac{l_a}{\mathcal{L}}$	Rapports % $\frac{l_a}{2a}$	Rapports % $\frac{l_a}{2a'}$	Comment sont réunis les deux ouvrages aux culées extrêmes	Tablier En quoi il est fait *Dispositif pour la dilatation* Tous ces croquis sont à 3mm	Cintres Type *Matériaux* Le 2e cintre ripé ou remonté sous la 2e voûte	Dépense totale D par m.q. de surface utile D : S_p [30] par m.c. de volume « utile » D : W [31]
Adolphe, sur la Pétrusse, à **Luxembourg** 1899-1903 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[1] (II, p. 67)	16m	*5m33*	5m92	84m65 1/2.73	72m	1m44 *2.16*	33	6.2	7.3	Au-dessus du sol par une voûte à axe vertical	Béton armé. *Les entretoises sont posées sur feuilles de plomb.*	Retroussé sur 56m30 *Sapin* Ripé	D = 1548456f D : S_p = 469f D : W = 19f6
des **Amidonniers,** sur la Garonne, à **Toulouse** (FRANCE, - *Haute-Garonne*) Pont 1903-07 / Dalle 1910-11 E^nE^n r^{te} ($\geqslant$ 40m)[1] (I, p. 193)	22	*3.25*	10	46 1/4.17 42 1/4.10 38.50 1/4.08	44.36 40.24 36.68	1.26 / *1.98* 1.21 / *1.98* 1.18 / *1.91*	14	7	7.3	Au-dessus du sol par une voûte à axe vertical	Béton armé. *Les entretoises portent sur des sommiers en pierre de taille par des balanciers en béton armé.*	Fixes *Sapin* On a construit en même temps les deux voûtes jumelles	D = 1145714f D : S_p = 202f5 D : W = 13f5
par-dessus la gare d'eau **Branla** (IV, p. 269) près de Lyon (FRANCE, - *Rhône*) 1906; $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te}; *Projet et Travaux :* M. Tavernier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	4	*0.60*	1.964	25 1/10	»	0.30 Aux reins 0m60 environ	15	2.4	»	Culée unique pour les 2 anneaux	Béton armé. Les arcs sont réunis par une dalle de 10cm en béton armé posée sur l'extrados.		D = 13000f entre culées D : S_p = 130f D : W = 15f9
sur l'Isère, à **Romans** (FRANCE, - *Drôme*) 1906-08 $\hat{A}^3\hat{A}^3$ (r^{te} et f^r) *Projet et Travaux :* M. Clerc, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	10	*2.50*	3.20	Voûte R G 34 1/2.57 Voûte centr. 33 1/2.73 Voûte R D 32 1/2.92	29 28.80 28.40	1.05 *3 env.*	25	7.3 7.6 7.8	8.6 8.6 8.7	Par une voûte en ellipse surhaussée	Fer, béton, briques.	Fixe Retroussés sur 26m / 32m *Bois* Remontés	D = 268217f D : S_p = 183f7 D : W = 14f9
de **Walnut Lane,** sur le Wissahickon Creek, à **Philadelphie** (ÉTATS-UNIS, - *Pennsylvanie*) 1906-08 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[2] (II, p. 83)	17.07	*5.49*	4.88	71.02 1/3.32	70.74	1.68 *2.90*	32	7.7	7.7	Les pilastres des grandes voûtes sont réunis par une voûte en béton armé. Les 2 grandes voûtes sont sur une même fondation	Poutres métalliques enrobées dans du béton faisant corps avec celui des tympans. *Tablier coupé au droit des petites piles.*	Fixe *Bois et Métal* Ripé	D = 1830000f D : S_p = 601f2 D : W = 21f2
de **Samoëns,** sur le Giffre (FRANCE, - *Haute-Savoie*) *(Biais à 65°)* 1907-08 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} *Projet et Travaux :* M. Schœndœrffer, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.	6	*1.50*	2	21 1/7	»	0.60 *0.90*	25	7.1	»	Fondation commune aux deux voûtes	Béton armé.	Fixe *Bois* Remonté	D = 27600f D : S_p = 131f4 D : W = 26f1
du **Creux,** sur l'Aumance (FRANCE, - *Allier*) 1908-09 E^3E^3 r^{te} *Projet et Travaux :* M. Ferrieu, Ingénieur des Ponts et Chaussées.	6	*2*	2.40	Voûte centr. 16.30 1/3.26 Voûtes de rive 15.70 1/3.20	15.45 15	0.70 *1.09*	30	12.2	12.9		Béton armé.	Fixe *Bois* Remonté	D = 40170f D : S_p = 106f9 D : W = 17f7
sur la **Rocky River,** près de **Cleveland** (ÉTATS-UNIS, - *Ohio*) 1908-10 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[3] (II, p. 95)	17.07	*5.49*	4.88	85.34 1/3.46	»	1.83 *3.35*	32	6.4	»	Fondation commune aux deux voûtes	Entre les 2 ponts, poutres enrobées ; au-dessus, béton armé de barres rondes. *Tablier coupé tous les 15m24.*	Retroussé sur 85m34 *Acier* Ripé	»
Sidi-Rached, sur le Rhummel, à **Constantine** (ALGÉRIE) 1908-12 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)[4] (II, p. 107)	12	*4.12*	3.92	68.76 1/2.76	67.57	1.50 *2.85 et 2.93*	34	5.9	6.1	— id. —	Béton armé.	Retroussé sur 56m *Sapin* On a fait 2 cintres	D = 1830000f D : S_p = 341f1 D : W = 13f4

§ 3. — *FAIRE EN DEUX ANNEAUX LES PONTS LARGES*

Art. 1. — Ce qu'enseigne le tableau précédent.

A. Épaisseur des anneaux. — Malgré l'augmentation du travail, on n'a pas augmenté à Luxembourg ni à Toulouse, l'épaisseur à la clef des formules usuelles.

B. Rapport à la portée libre de la largeur d'un anneau.

Cette largeur est :

7,3 % de la portée libre, à Luxembourg, aux Amidonniers ;

6 % de la portée totale, à Luxembourg.

Elle a suffi : au décintrement des deux voûtes de Luxembourg, des dix voûtes des Amidonniers, les appareils disposés aux têtes n'ont accusé aucune tendance au flambement.

Art. 2. — Economie.

— Par rapport à un pont « plein », l'économie a été d'environ : 250.000 f à Luxembourg, soit 16 % ; 300.000 f aux Amidonniers, soit 26 % [33].

Art. 3. — Faire en deux anneaux les ponts larges.

— Un pont est fait pour la circulation. Ce qui sert, c'est la largeur entre parapets, trop souvent insuffisante dans les ponts de ville [34, 35] : ce qui coûte, ce sont les maçonneries mal utilisées des fondations, des piles et des voûtes.

Plaçons donc une très large chaussée sur de très minces anneaux dont on aura réduit la largeur et l'épaisseur à juste ce qu'il faut pour ne craindre ni écrasement, ni flambement transversal.

Si on demande à la maçonnerie de ces anneaux tout l'effort qu'elle peut supporter sans danger, si on peut ne rien sacrifier pour l'aspect, on arrivera à une économie qu'aucun autre système ne paraît, en l'état, pouvoir donner [36].

Les premiers ponts ainsi faits pourront sembler élargis après coup. Mais on s'y fera. L'idée est juste : on trouvera, — peut-être a-t-on trouvé, — des formes que l'œil accepte.

33. — I, p. 207.

34. — Au XVIIIe siècle, on a donné souvent aux grands ponts 45 pieds (14m75) entre parapets (Orléans, Tours, Concorde,...) : c'est devenu tout-à-fait insuffisant à la Concorde.

Dans une grande ville, il faut au moins 16m, mieux 20m, 22m. — Le pont d'Austerlitz a été élargi de 12m74 (1805) à 18m (1854), puis à 29m80 (1884). Le pont au Change a 30m, le pont Alexandre III, 40m, le pont de Charlottenbourg à Berlin, 55m (Génie Civil, 26 juin 1909).

f_8 — $\mathcal{L}$ — l L l

35. — On règle L (f_8) suivant ce qui passera dessus : voitures, tramway, chemin de fer d'intérêt local ; l, suivant le nombre de piétons.

Comme première indication, on peut admettre que les trottoirs doivent laisser passer autant de piétons de 0m75 que la chaussée de voitures de 2m50 : $\frac{l}{L} = \frac{0.75}{2.50} = 0,3$. 1/3 est bon pour l'aspect ; à moins de 1/4, le trottoir est maigre.

36. — Voici, pour quelques ponts, ce qu'a coûté le m.q. de surface offerte à la circulation :

11 ponts en maçonnerie construits à Paris de 1806 à 1866 ont coûté de 304f (Austerlitz, 1854), à 578f (Petit Pont, 1853), les 2 autres, 746f (Pont National, 1853), 752f (Pont au Double, 1847). — Morandière, *Construction des Ponts*, Tome I. p. 340).

Les ponts récents à grands arcs d'acier ont coûté : Pont Mirabeau, à Paris (1893-95), 594f ; Pont Alexandre III, à Paris (1897-1900), 1120f ; Ponts sur le Rhône à Lyon : La Fayette (1888-90), 623f ; Morand (1888-90), 678f ; Université (1903), 441f ; Pont de Rouen, 889f.

Les trois derniers ponts en maçonnerie construits sur la Garonne (sous chemin de fer à 1 voie) ont coûté au m.q. : pont de Port-Sainte-Marie, 612f ; de Marmande (1877-81), 695f ; de Belleperche (1895-1900), 312f.

Aux Amidonniers, — pont de luxe, — le m.q. de surface offerte à la circulation, ne coûte que 202 (I, p. 207).

TITRE VIII

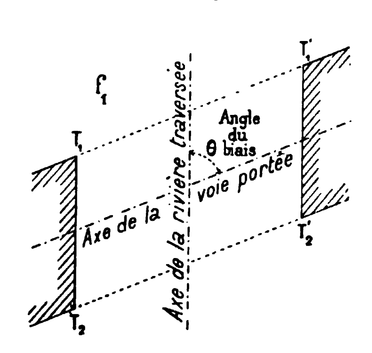
PONTS BIAIS

CHAPITRE I

VOÛTES BIAISES

§ 1. — *DÉFINITIONS*

Art. 1. — Berceau biais. — Un berceau est biais quand ses têtes $T_1 T'_1$, $T_2 T'_2$, ne sont pas perpendiculaires au plan vertical des génératrices de la douelle (f_1).



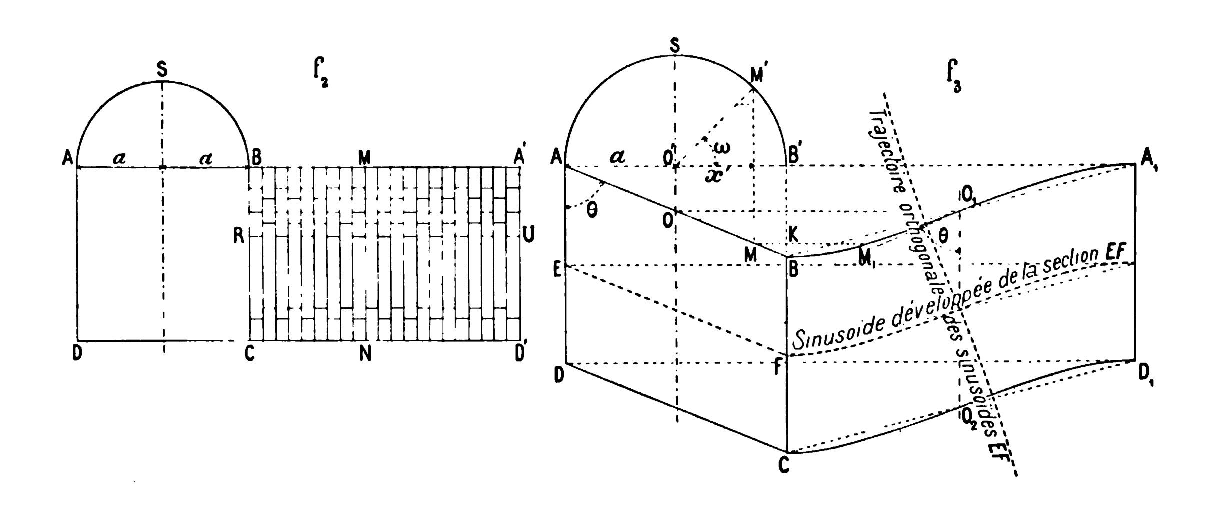
Art. 2. — Angle du biais. — Le biais est l'angle aigu θ[1] que fait l'axe de l'ouvrage avec celui de la voie ou de la rivière traversée (f_1).

Art. 3. — Développement de la douelle. — Deux systèmes de lignes orthogonales. — Considérons un berceau droit (f_2). Fendons-le suivant AD et développons la douelle autour de BC.

Sur le développement, on voit deux systèmes de lignes à angle droit :

des joints discontinus parallèles aux têtes, tels que RU ;

des lignes continues d'assises, — ou lits, — telles que MN, génératrices du berceau, perpendiculaires aux têtes.



1. — Quand la voûte est droite, $\theta = 90°$. Il eût été plus rationnel de mesurer le biais par son complément θ' : la difficulté du biais eût cru avec θ'.

De même, soit un berceau biais de section droite ASB' (f_2) : fendons-le suivant AD et développons-le autour de BC.

On tracera sur la douelle développée, deux systèmes de lignes à angle droit :

les sinusoïdes, développements [2] des têtes et des sections parallèles aux têtes : ce seront les lignes des joints discontinus ;

les trajectoires orthogonales de ces sinusoïdes : ce seront les lits continus [3].

§ 2. — *APPAREILS BIAIS* [4]

Art. 1. — Appareil orthogonal parallèle. — Sur la douelle développée, on trace les sinusoïdes (développements des sections parallèles aux têtes), leurs trajectoires orthogonales ; puis on les relève horizontalement et verticalement [5].

2. — Un point quelconque M de la tête vient en M_1 (f_2), tel que :

$$KM_1 = x_1 = \text{arc } B'M'$$
$$BK = y_1 = \frac{MK}{\text{tg } \theta} = \frac{(a - x')}{\text{tg } \theta}.$$

Comme les arcs se conservent en développement, la courbe BO_1A_1 est inclinée sur les génératrices, de θ en O_1.

Si c'est une voûte complète (plein cintre, ellipse), elle leur est normale en B et A_1.

Si ASB' est un plein cintre de rayon a,

$$x_1 = a\omega$$
$$y_1 = \frac{a(1 - \cos\omega)}{\text{tg } \theta}$$

tangente en $M_1 = \dfrac{dy_1}{dx_1} = \dfrac{\sin\omega}{\text{tg } \theta}$. On la construit facilement.

3. — $X_1 = x_1 = a\omega$ $\quad \dfrac{dY_1}{dX_1} = -\dfrac{dx_1}{dy_1} = -\dfrac{\text{tg } \theta}{\sin\omega} \quad dY_1 = -\dfrac{\text{tg } \theta \, a \, d\omega}{\sin\omega}.$

$$Y_1 = -a \,\text{tg } \theta \, L \,\text{tg} \frac{\omega}{2} + \text{constante}.$$

Toutes ces trajectoires sont les mêmes. On en construit une, puis on en découpe un patron.

Φ_1 – Pont de Rimini [4 bis]



4. — Déjà le pont de Rimini est appareillé biais (Φ_1).

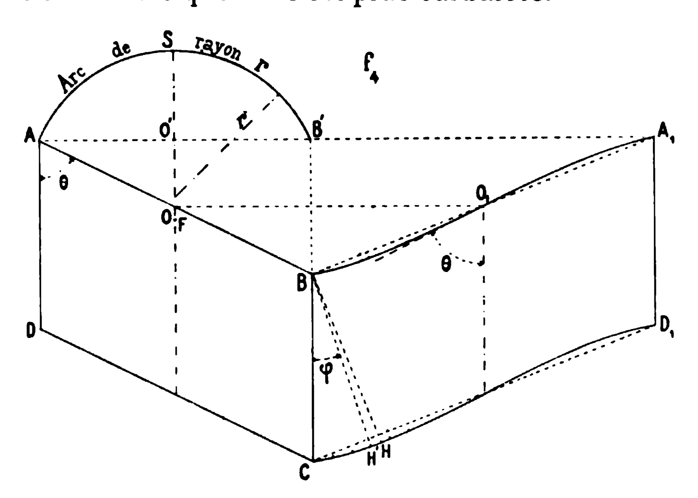
4bis. — Date de la photographie : septembre 1908.

5. — Je renvoie, pour les appareils et les épures, aux Cours de Stéréotomie et à la fort copieuse littérature des voûtes biaises : on y doit tout spécialement distinguer l'excellent Traité : « *Appareil et Construction des ponts biais* » de Graeff (alors Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées), Paris, Dunod, 1867.

Art. 2. — Appareil héliçoïdal. — Divisons en parties égales les deux arcs de tête. Menons la normale BH à la corde BO_1A_1. Prenons le point de division le plus voisin H' et joignons BH'

Aux trajectoires orthogonales des sinusoïdes parallèles BO_1A_1, substituons les parallèles à BH'.

Elles en diffèrent d'autant moins que la corde est plus voisine de l'arc BO_1A_1, c'est-à-dire que l'arc est plus surbaissé.

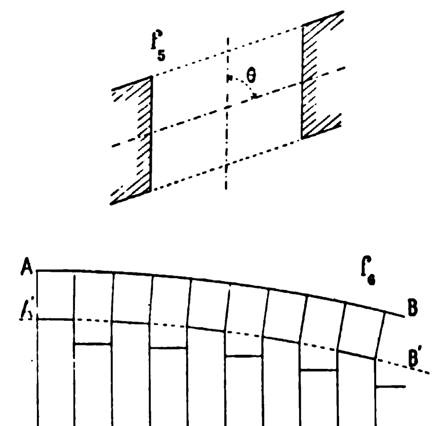


Ces droites font avec les génératrices l'angle « intradossal rectifié » φ : elles s'enroulent sur la douelle en décrivant des hélices de pas $\frac{2\pi r}{\text{tg}\,\varphi}$, d'où le nom de l'appareil.

Tous les joints dans le plan de tête passent par un même « foyer » F tel que :

$$SF = r\left(1 + \frac{\text{tg}\,\varphi}{\text{tg}\,\theta}\right)$$

§ 3. — *CHOIX DE L'APPAREIL SUIVANT LE BIAIS* (f5).



Art. 1. — θ > 80°. — On appareille comme si la voûte était droite.

Art. 2. — θ entre 70° et 80°. — Soient AB, A'B' les sinusoïdes, développements de l'intrados du bandeau, et de la courbe des queues des voussoirs courts.

Ils sont appareillés normalement à ces deux courbes : les longs, au-delà de la queue des courts, sont retournés suivant les génératrices.

La douelle est celle d'une voûte droite[6].

Art. 3. — θ entre 60° et 70°. — On emploiera l'appareil « héliçoïdal » quel que soit l'intrados. On trace les lits et joints sur le platelage du cintre en pliant dessus une règle flexible.

Sauf aux têtes, les matériaux de douelle sont rectangulaires (moellons, briques[7]).

6. — Viaduc de l'Epau (Ligne de Tours à Vendôme) : portée = 10m10 ; θ = 70°. Nous avons fait ainsi des passages supérieurs, des têtes de souterrains.

7. — Dès l'origine des chemins de fer, en Angleterre, pays de briques, on a employé l'appareil héliçoïdal.

Art. 4. — θ entre 50° et 60°. — On adoptera quand on le pourra des arcs surbaissés, et alors l'appareil héliçoïdal, lequel diffère peu de l'appareil théorique près de la clef, et de plus en plus à mesure qu'on s'en éloigne.

Si un plein cintre ou une ellipse s'impose, et que l'aspect n'importe pas, on acceptera la construction de Léveillé[8], lequel limite l'appareil héliçoïdal au cerveau de la voûte, et appareille les reins en voûte droite : avec ses joints ainsi brisés, il se rapproche de l'appareil théorique à la clef et aux naissances. Il y a aux reins une file de crossettes motivées seulement pour des yeux avertis.

Mais si l'aspect importe, il faudra bien pour les pleins cintres et les ellipses, en venir à l' « appareil orthogonal parallèle ». Il est cher, de projet laborieux, d'exécution délicate, et laid[9], même bien exécuté[10].

Art. 5. — $\theta < 50°$. — Les appareils biais ne sont plus pratiques. Si on ne peut pas découper l'ouvrage en arcs droits indépendants, on fera un pont métallique ou en béton armé.

§ 4. — *TRÈS LONGUES VOÛTES BIAISES*

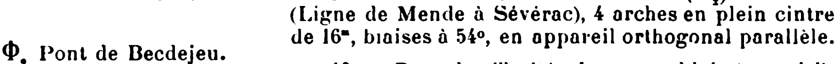
Les traités des Ponts biais indiquent les dispositions à adopter pour n'appareiller en biais que les abords des têtes dans les longues voûtes biaises (ouvrages sous grands remblais, têtes de souterrains....) : appareil orthogonal convergent, difficile et cher ; — héliçoïdal, qui l'est un peu moins ; — appareil Léveillé modifié[11].

§ 5. — *PORTÉE LIMITE DES VOÛTES A APPAREIL BIAIS*

Une des plus grandes paraît être celle de Tavignano en Corse (ligne de Bastia à Corte)[12,13] biaise à 53°, — têtes en ellipse de 30ᵐ au 1/4, — appareil orthogonal parallèle.

8. — Elle est indiquée à l'APPENDICE, — ouvrages de 8ᵐ d'ouverture et au-dessous.

9. — J'ai le droit, comme auteur du projet (1877), de qualifier ainsi le pont de Becdejeu (Φ_2) sur le Lot (Ligne de Mende à Sévérac), 4 arches en plein cintre de 16ᵐ, biaises à 54°, en appareil orthogonal parallèle.



Φ_2 Pont de Becdejeu.



10. — Dans les Traités des ponts biais (renvoi 4), on indique comment, aux têtes très biaises, on abat par un chanfrein les angles aigus, comment on évase la tête en bouche de cloche, comment on découpe les panneaux des voussoirs de tête, etc,...

11. — Annales des Ponts et Chaussées, décembre 1879, p. 339. « *Simplification pratique de l'appareil orthogonal convergent. Application au pont souterrain des Kœurs* ». M. A. Picard, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

12. — Annales des Ponts et Chaussées. Décembre 1882, p. 578. « *Appareil orthogonal dans les voûtes biaises dont la section droite est une ellipse surbaissée* » — par M. Sampité, Ingénieur des Ponts et Chaussées. (Pont de Tavignano p. 587, Pl. 32).

13. — La voûte de 40ᵐ de Pont-sur-Yonne (I, p. 213) est biaise à 70° ; celle de 47ᵐ50 du pont Elise (IV, p. 151) à 81°20' ; celle de 50ᵐ du pont de Munderkingen (IV, p. 55) à 75° : elles sont toutes en béton.

§ 6. — *PRÉCAUTIONS DANS L'EXÉCUTION DES VOÛTES BIAISES*

Art. 1. — Cintres. — Les cintres des voûtes biaises doivent être exceptionnellement rigides ; il faut éviter les cintres retroussés, sauf pour les petites ouvertures, et contreventer à outrance.

Pour un ouvrage très long, on déviera les plans des fermes à partir de chaque tête, de façon à les orienter au plus tôt suivant la section droite de la voûte.

Les fermes doivent être reliées par des entretoises biaises, c'est-à-dire parallèles aux génératrices de la voûte, et par des entretoises droites ou des tirants perpendiculaires aux plans des têtes [14].

Il est bon de clouer sur les couchis un platelage sur lequel on trace les lits de douelle.

Art. 2. — Maçonnerie des voûtes. — On maçonnera les voûtes en bon mortier de ciment; on les laissera très longtemps sur cintre pour réduire les tassements, très dangereux pour elles [15].

§ 7. — *OBSERVATIONS DIVERSES*

Art. 1. — Pas de voûtes d'évidement apparentes au-dessus des voûtes biaises. — Il faut bien se garder de traverser les tympans des voûtes biaises par des voûtes apparentes, droites ou biaises.

Elles y font assez mauvais effet, et il y a, pour les accrocher sur les grandes voûtes, des appareils fort compliqués.

Art. 2. — Ne pas craindre, ne pas rechercher les voûtes biaises. — Les voûtes biaises sont chères, assez désagréables, même bien faites. Il convient de les éviter, mais sans payer trop cher un redressement du tracé.

Il ne faut pas en avoir peur, mais encore moins les rechercher par amour du compliqué.

§ 8. — *PILES BIAISES SOUS VOÛTES BIAISES TRACÉ DES BECS*

Art. 1. — Bec en ellipse. — On peut adopter une ellipse rapportée à Ox, Oy', directions conjuguées (f_7) :

$$\frac{x^2}{\left(\frac{E}{2}\right)^2} + \frac{y'^2}{\left(\alpha\frac{E}{2}\right)^2} = 1$$

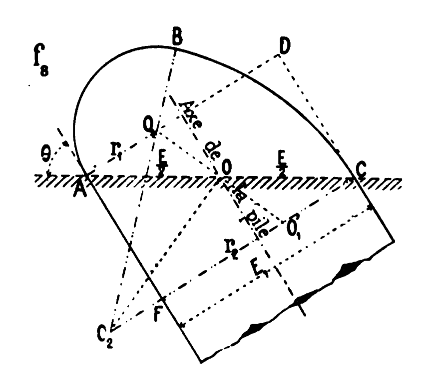
Pour $\alpha = 1$ OB = OA = OC

On l'effilera un peu avec $\alpha = \frac{1}{\sin\theta}$: (c'est déplacer de M' en M chaque point de la 1/2 circonférence AB'C) (f_7).

f₇ y' y B B' M(x,y') M'(x,y) θ Axe de la pile A F θ O F P C x

14. — Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 63. M. Thérel: Deux passages supérieurs biais de la Corniche de l'Estérel, entre Fréjus et Cannes, par-dessus la ligne de Marseille à Nice ; voûtes construites sur cintre retroussé, par rouleaux, joints secs; bandeaux reliés à la douelle par des feuillards ; dépense 113f, 137f par m. q. de surface couverte.

15. — Le pont par-dessus la rue d'Alésia à Paris (Ligne de Paris à Sceaux) a été si éprouvé au décintrement qu'il a fallu le reconstruire. On y aurait pu prendre la précaution, autrefois recommandée, de relier les têtes par des tirants en fer.



Art. 2. — Bec en anse de panier à deux rayons r_1 r_2. — C'est moins simple.

Les centres sont sur AD et CF (f_8).

Je prends $CO'_1 = AO_1 = r_1$. Je joins $O_1O'_1$ qui passe par le milieu O de AC, et j'élève en O la perpendiculaire OO_2 à $O_1O'_1$.

O_2 est le 2e centre, O_2C le 2e rayon r_2.

r_1 a été pris arbitrairement. On peut s'imposer une deuxième condition : par exemple celle-ci, la plus usitée : OA = OC = OB (f_9)[16], ou une autre[17].

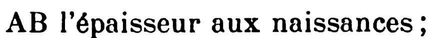
CHAPITRE II

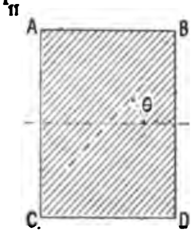
VOÛTES DROITES

DONT L'AXE EST OBLIQUE SUR LA RIVIÈRE OU LA VOIE TRAVERSÉE

Art. 1. — Ouvrages à une seule arche. — En augmentant la portée on peut, par une voûte droite, franchir obliquement une rivière : il y en a maints exemples[18].

Art. 2. — Ouvrages à plusieurs arches. Voûtes droites sur piles biaises. — La coupe horizontale d'une pile aux naissances est un rectangle dont les côtés sont :

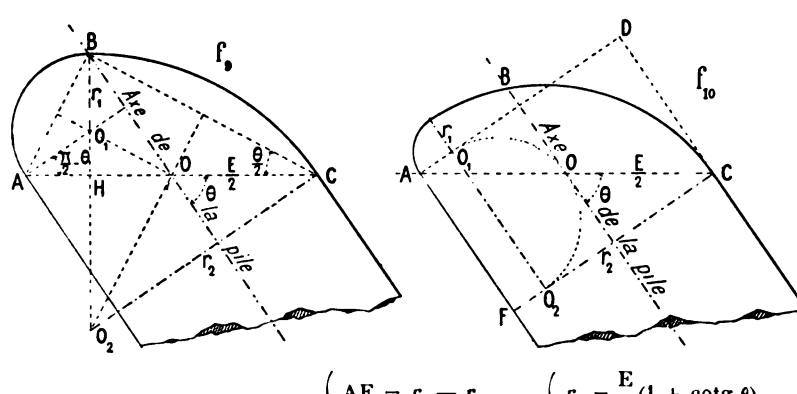




AB l'épaisseur aux naissances ;

AC la largeur de la voûte.

Ce rectangle assure la stabilité de la voûte, mais non l'écoulement des eaux.



16. — Les centres sont les points de rencontre des hauteurs dans les deux triangles isocèles ABO, OBC (f_9) :

$$r_1 = \frac{E}{2}\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \qquad r_2 = \frac{E}{2}\operatorname{cotg}\frac{\theta}{2}$$

17. — La différence $r_2 - r_1 = O_1O_2$ (f_{10}) (longueur interceptée entre AD et CF) est minima pour O_1O_2 perpendiculaire à AD, c'est-à-dire parallèle à l'axe de la pile. On a (f_{10}) :

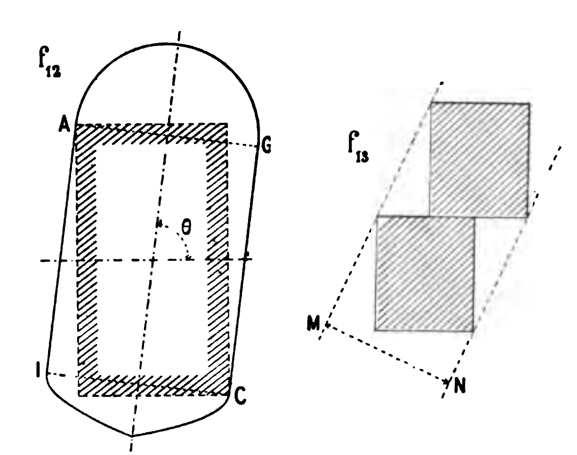
$$\begin{cases} AF = r_2 - r_1 \\ E = r_2 + r_1 \end{cases} \qquad \begin{cases} r_2 = \frac{E}{2}(1 + \operatorname{cotg}\theta) \\ r_1 = \frac{E}{2}(1 - \operatorname{cotg}\theta) \end{cases}$$

La courbe est fort aplatie aux reins : elle peut convenir à un arrière-bec.

18. — Castelet (II, p. 130), Escot (II, p. 174), Gour-Noir (III, p. 103), Pouch (III, p. 110), Freyssinet (III, p. 112), Jaremcze (III, p. 114), Diveria (III, p. 130),...

Si le pont est droit, il suffit d'ajouter des becs.

S'il est biais, enveloppons le rectangle « nécessaire » par un polygone, par une courbe, de façon à avoir la moindre surface (par économie), le moindre encombrement de la rivière.



On tracera l'enveloppe au mieux suivant le biais, la largeur du pont, l'épaisseur de la pile.

Au besoin, on aplatira l'arrière-bec[19].

Pour les faibles biais ($\theta > 80°$), on acceptera le rectangle AGCI et deux becs (f_{12}).

Avec deux arcs décrochés (f_{13}), on réduit l'enveloppe et l'encombrement.

Nous avons fait le pont de la Croix sur le Doubs (Ligne de Frasne à Vallorbe), biais à 45°, en deux voûtes droites de 4^m de largeur, déplacées l'une par rapport à l'autre de 4^{m}206 (Φ_3)[19bis].

Elles reposent sur une pile rectangulaire sans bec qui fait sur l'eau l'effet d'un avant-bec à 90°[20].

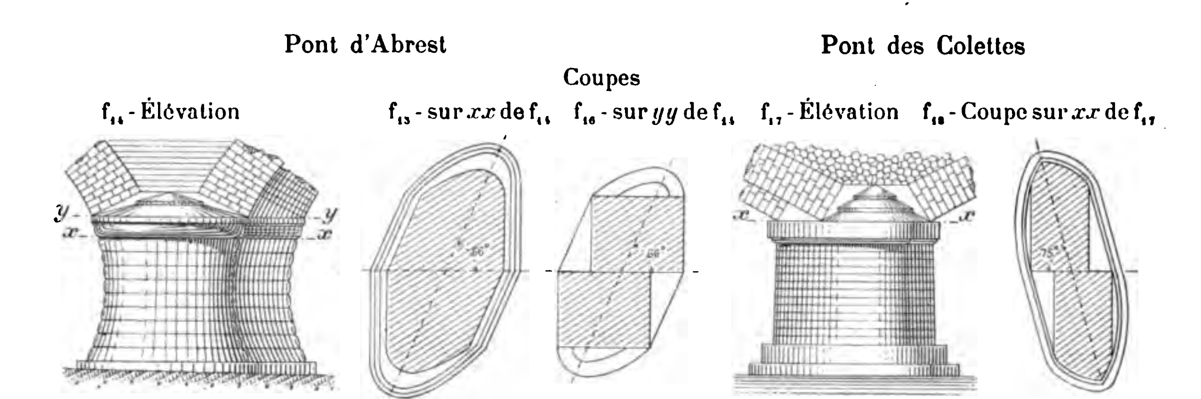
Φ_3 — Pont de la Croix, sur le Doubs — mai 1914



19. — Canale (III, p. 185). 19bis. — Portée : 20^m ; montées : 4^{m}374 et 4^{m}350.

20. — Les becs sont à 90° : au pont du Vieux-Château, à Vérone (III, p. 173) ; au vieux pont de Toulouse (1542-1632) : il a aujourd'hui plus de 300 ans ; il a résisté à quantité d'inondations, en particulier à celle de juin 1875, qui a emporté nombre de ponts plus jeunes ; au pont d'Ornaisons (1750-1760) (I, p. 63) ; au pont de la Big-Muddy River (I, p. 225) ; à un pont sur la Delaware (III, p. 289),.....

Voici ce que nous faisons (f_{14} à f_{16}) au pont d'Abrest[21], biais à 66°, 7 ellipses de 33m surbaissées à 1/3,63 :



et ce que nous ferons (f_{17}, f_{18}) au pont des Colettes[22], biais à 75°, 4 arcs de 23m à 1/7,5.

Dans ces ponts, les 2 anneaux accolés ne sont pas reliés : ils ne se contrarieront pas au décintrement.

Art. 3. — Voûte en arcs droits minces.

— On peut découper une voûte biaise, non plus seulement en deux, mais en autant d'anneaux que l'on veut, soit accolés, soit séparés[23,24].

Les arcs doivent être assez larges pour ne pas flamber.

Ils ont beaucoup de parement et d'appareil.

Art. 4. — Ouvrages courants sous remblais, droits, à plinthe rampante.

On les adoptera toutes les fois que la hauteur le permettra[25].

Φ_4



21. — sur l'Allier (Ligne de Riom à Vichy).

22. — sur la Sioule (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat).

23. — Pont d'Albi sur le Tarn, biais à 74°, 5 pleins-cintres de 27m60 en 5 anneaux de 1m714, espacés de 0m857. — Pont de Tounis, sur un bras de la Garonne à Toulouse, biais à 45°, — arc de 24m au 1/6 en 9 anneaux de 1m espacés de 0m80.

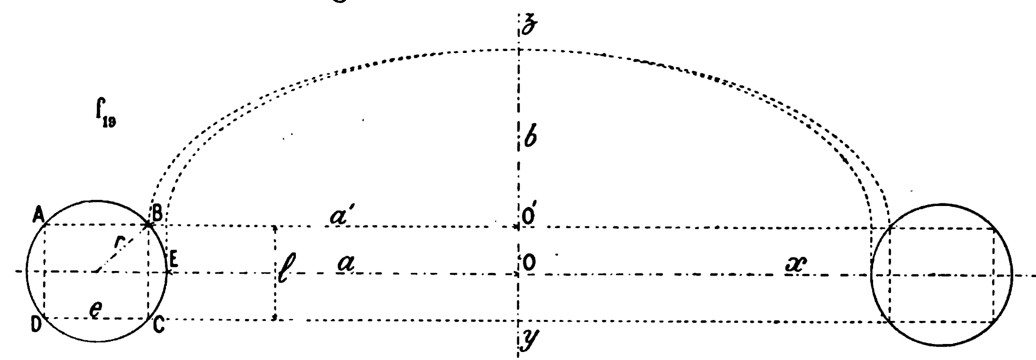
24. — Passage supérieur de la gare de Mende (Φ_4), biais à 42°, en 5 anneaux de 24m70 à 21m40 de portée*, 3m048 de montée, larges de 1m575, espacés de 1m19.
*Les 2 culées ne sont pas parallèles.

25. — Voir APPENDICE.

CHAPITRE III

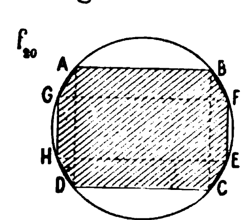
VOÛTES DROITES, NON EN BERCEAU, SUR PILES RONDES

Soit ABCD le « rectangle nécessaire » [26]. Traçons le cercle circonscrit.



Engendrons la douelle par une courbe (ellipse, arc,...) de montée constante et de portée croissante, de O E à O' B [27,28].

Soit par exemple, une voûte de 36ᵐ d'ouverture, sous chemin de fer à 1 voie, c'est-à-dire de 4ᵐ50 de largeur. Donnons à la pile 1/8 de la portée, soit 4ᵐ50. Le « rectangle nécessaire » est, ici, un carré.



Le « ventre » est $\frac{l}{2}(\sqrt{2}-1) = 0{,}207\ l$.

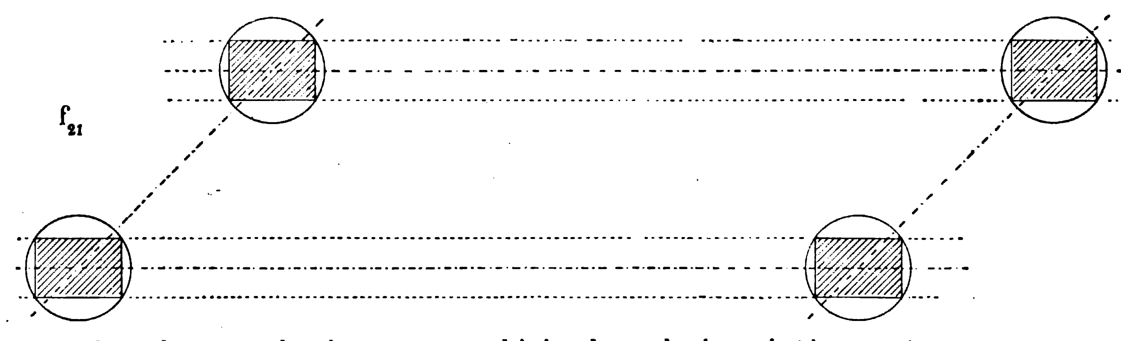
On peut accepter cette douelle ventrue pour $l \leqslant e$.

On pourrait aussi conserver la voûte en berceau sur la bande GHFE (f_{20}), et échancrer les têtes par les voussures BF, EC.

CHAPITRE IV

PONTS EN DEUX ANNEAUX

Si le pont des Amidonniers eut été biais, on eût pu faire ceci (f_{21}) :



Il y a là, pour les larges ponts biais, des solutions intéressantes.

26. — Chap. II, art. 2. 27. — Ponts de Maretta et de Prarolo (III, p. 95).

28. — L'équation de la douelle rapportée à Ox, Oy, Oz, est :
si la génératrice est une ellipse (a b),

$$\left\{ \frac{b^2 x^2}{b^2 - z^2} - \left[(a+r)^2 - y^2 + r^2 \right) \right] \right\}^2 = 4\,(a+r)^2\,(r^2 - y^2)$$

si c'est un arc de cercle,

$$\left[b \left\{ x^2 + (b-z)^2 \right\} - \left\{ (a+r)^2 + b^2 + r^2 - y^2 \right\} (b-z) \right]^2 = 4\,(r^2 - y^2)\,(a+r)^2\,(b-z)^2.$$

TITRE IX

VOÛTES EN COURBE [1]

A l'APPENDICE, on trouvera tout ce qui concerne les ouvrages courants et les viaducs en courbe.

Dans les grandes voûtes [2], les plinthes et les parapets sont en général en ligne droite, suivant la corde du tracé; l'ouvrage est élargi, sur la portée 2 a, de la flèche $\frac{4\,a^2}{8\,R}$; les têtes sont planes.

Au pont de Krenngraben [3] en courbe de 320^m, du côté du centre le parapet suit le tracé; la plinthe concave est portée près des culées par des corbeaux de saillie variable.

TITRE X

PONTS EN RAMPE, EN DOS D'ÂNE

§ 1. — *PONTS EN RAMPE*

Art. 1. — Ponts sous route ; ponts sous chemin de fer. —
Un ouvrage à rampe unique semble tomber vers sa culée basse.

On plie en dos d'âne les ponts-route dans les villes ; mais les ponts sous chemin de fer suivent la rampe du tracé.

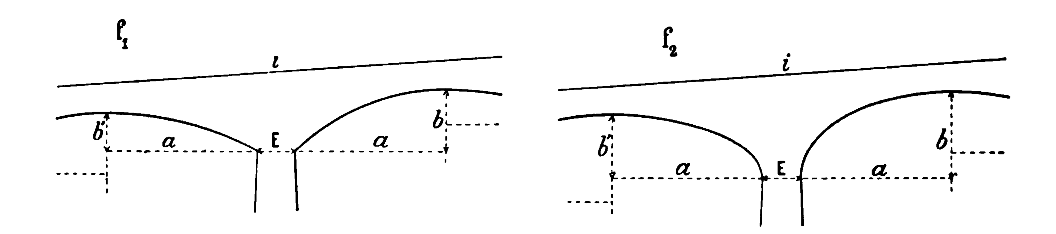
Art. 2. — Ouvrages courants. Viaducs. —
Voir l'APPENDICE.

Art. 3. — Ouvrages bas. —
L'eau, les socles des piles, font des plans horizontaux de comparaison très voisins des naissances : on les met au même niveau des deux côtés de chaque pile.

Pour les pleins cintres, voir l'APPENDICE, Viaducs.

Pour les arcs et les ellipses, on fait chaque voûte de deux 1/2 voûtes ayant la 1/2 ouverture, et dont les montées diffèrent de :

$$\left[2\,a\ (\text{portée}) + E\left(\begin{smallmatrix}\text{Épaisseur}\\ \text{de la pile}\end{smallmatrix}\right)\right]\ i\ (\text{rampe})$$



1. — Le frère Joconde, de Vérone, a construit au XVIe siècle, près d'Aquino, le célèbre « *ponte Corvo* » en courbe d'environ 200^m de rayon, convexe vers le courant.
Croizette-Desnoyers. « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 54 ; Pl. VI, fig. 8.

2. — Ponts à 2 voies : Maretta, Prarolo (III, p. 93) ; Pouch (III, p. 110).
Ponts à 1 voie : Castelet (II, p. 130), Schwändeholzdobel (III, p. 126), Krenngraben (III, p. 134), Salcano (III, p. 141).

3. — III, p. 134.

Art. 4. — Tracé des grandes voûtes en rampe. — La 1/2 voûte la plus haute est la plus chargée : la courbe de pression s'y rapproche de l'extrados.

On l'a, quelquefois, plus cambrée [1, 2], plus élégie [2].

Art. 5. — Intrados des voûtes en très forte rampe (sous un escalier, sous un chemin de fer à crémaillère, sous un funiculaire). — On peut adopter une ellipse rampante [3], dont la ligne des naissances soit inclinée suivant la pente et son diamètre conjugué vertical [4], ou une courbe composée d'un arc de parabole et d'un arc de cercle...

§ 2. — *PONTS EN DOS D'ÂNE*

Art. 1. — Pour l'aspect, un long pont doit toujours être en dos d'âne [5]. — Si les lignes du couronnement ne sont pas convexes, elles paraîtront creuses au milieu [6, 7].

Φ — Vieux Pont d'Orléans — (1751-1760) [7bis]





Un ouvrage en dos d'âne a un milieu et deux extrémités : il fait un tout.

1. — Munderkingen (IV, p. 55), rampe de 30mm ; Illerbeuren (IV, p. 159), rampe de 22mm5.

2. — Ramounails (II, p. 186), rampe de 59mm.

3. — Dans un pont, un viaduc en pente, les génératrices de douelle demeurent horizontales ; dans un pont sous remblai, dans un souterrain en pente, elles sont inclinées sur l'horizon, la voûte est en pente : quand les naissances d'une voûte en berceau sont à des niveaux différents, elle est « rampante ».

4. — Amidonniers (I, p. 193), arches sous l'escalier des culées.

5. — Les ponts de Paris, de Lyon, d'Orléans, de Blois, de Toulouse, de Bordeaux, sont en dos d'âne.

6. — Les Grecs ont courbé vers le ciel l'entablement, le dallage du Parthénon : l'œil les voit horizontaux.

7. — Le pont de Tours est en palier : c'est fâcheux.

7bis. — Voir Tome III, p. 258, renvoi 8. — Date de la photographie : août 1905.

Quand les deux rives sont à des niveaux différents, on force la pente à partir de la rive haute pour avoir un point haut au milieu [8].

Les deux rampes ne sont pas nécessairement égales : elles sont à la demande des quais [9].

Φ_2 — Pont sur le Serchio [13, 11-a]



Dans les longs ponts, pour l'aspect comme pour la circulation, il ne faut pas un dos d'âne à trop grandes pentes [10, 11]; 1cm fait très bien (Φ_1) [12].

Mais dans les courts, surtout dans les ponts à une arche, l'œil accepte de très fortes rampes (Φ_2, Φ_3, Φ_4).

Ponts à Venise [14-b]

Φ_3



Φ_4



Art. 2. — Intrados des ponts en dos d'âne. — L'œil rapporte tout au plan de l'eau. On place les naissances au même niveau, non plus seulement de part et d'autre de chaque pile, mais toutes.

8. — Pont de Luxembourg (II, p. 68, n° 2).

9. — Le pont au Change est en rampes de 10 et 20mm; le pont Saint-Michel, de 15 et 6mm; le nouveau pont d'Orléans, de 10 et 4mm.

10. — Les rampes sont de : 17mm au pont de l'Alma, 20mm aux ponts Mirabeau et Alexandre III, 24mm au pont des Invalides, 26mm au pont du Midi sur le Rhône à Lyon.

11. — Pont de Blois (Φ_1, p. 32), en pente et rampe de 49mm; pont de Toulouse (Φ_5, p. 84), en déclivités de 22mm7 et 40mm4; le sommet est trop haut au-dessus des quais.

12. — Vieux pont d'Orléans, 8 lignes par toise, soit 0,097 ou 1 % (Φ_1).

13. — Entre Lucques et les Bains-de-Lucques.

14. — Date des photographies : *a* - octobre 1906; *b* - mai 1911.

On augmente les montées, des rives à l'arche du milieu :

soit en conservant la même ouverture [14 bis] ;

soit, bien mieux, en augmentant en même temps les portées dans un rapport à étudier [15].

Les piles doivent résister à la différence des poussées : c'est dangereux si elles sont fondées sur pilotis [16].

Φ_s — Vieux Pont de Toulouse (1542-1632) [20]



Art. 3. — Raccordement des déclivités au sommet. — On y peut :

soit laisser les deux rampes avec leur angle (Φ_s) [17]; il s'accentue, vu de biais ;

soit les raccorder par une courbe [18, 19].

14 bis. — Exemples :

	Voûtes de rive Portée	Voûtes de rive *Montée*	Voûtes centrale Portée	Voûtes centrale *Montée*	Pente en *mm*
Pont des Invalides (4 arches)	31m87	*3m338*	31m69	*4m108*	24mm
de Valence (4 arches)	49.20	*11.575*	49.20	*12.305*	34

15. Pont	Nombre d'arches	Voûtes de rive Portée	Voûtes de rive *Montée*	Voûtes centrale Portée	Voûtes centrale *Montée*	Pente en *mm*
Vieux Pont d'Orléans	9	29m88	*8m13*	32m48	*9m10*	10mm
Pont de l'Alma	3	38.50	*7.70*	43	*8.60*	»
Pont de Tolbiac	5	29	*7.09*	35	*8.18*	17
Vieux Pont de Toulouse	7	13.36	*7.68*	31.82	*12.54*	41 et 23.7
Pont de Verdun	3	38.50	*8.52*	41	*9.47*	30 et 15

16. — Accident du pont des Invalides, en 1878.

17. — Ponts du Moyen-Age : ponts de Toulouse, de Blois, d'Orléans ; — ponts de Luxembourg (II, p. 60), Plauen (III, p. 14),...

18. — Mantes (I, p. 140), Valence (I, p. 142), Édouard VII (I, p. 144), Amidonniers (I, p. 188), Orléans (III, p. 232),...

19. — Ponts Morand et La Fayette, à Lyon, en arc de cercle de 5206m de rayon, incliné à 0m02 à la rencontre des murs de quai ; — Pont du Prince-Régent (IV, p. 222).

20. — Date de la photographie : août 1903.

TITRE XI

COMMENT ON AJUSTE L'OUVRAGE AU TERRAIN

CHAPITRE I

QUELQUES SILHOUETTES D'OUVRAGES
SUR QUELQUES FORMES DE TERRAIN

§ 1. — *FAIRE LES OUVRAGES A LA DEMANDE DU TERRAIN*

Art. 1. — Indications générales. — Supposons arrêtée la place des culées, — soit d'un pont, pour laisser passer les crues, — soit d'un viaduc, à la limite pratique de la hauteur des remblais[1].

Quelles portées adopter?

C'est affaire d'espèce, de circonstances locales.

La seule règle est d'ajuster l'ouvrage aux lieux, de le faire à leur mesure.

Art. 2. — Cas où la place des piles est imposée par un ouvrage voisin. — Si deux ponts sont tout-à-fait voisins, les piles de l'un doivent, — pour la navigation et aussi pour l'écoulement des eaux, — être à peu près en prolongement des piles de l'autre[2].

Art. 3. — Nombre pair où impair d'arches. — L'œil accepte à peine quatre arches[3,4], à grand'peine deux.

Art. 4. — Comment on arrête la silhouette de l'ouvrage. — On trace sur du papier calque les élévations possibles; on les promène sur le profil en long de la traversée, pour les bien placer, assurer le passage des chemins, mettre une arche au-dessus du creux de la vallée, etc...[1]

Pour un grand ouvrage, on étudiera ses dispositions d'ensemble à temps pour modifier au besoin le tracé.

Quand le choix est restreint à un petit nombre de solutions, on étudie des projets comparatifs, d'abord en gros, puis, s'il y a doute, de près.

Les portées arrêtées, on étudie pour chaque partie toutes les variantes sur calques en retombe: c'est toujours trop tôt qu'on cesse d'étudier.

§ 2. — *OUVRAGES BAS: PONTS*

Si le lit mineur est bien défini entre des berges, des quais, des levées insubmersibles, on le franchit par un ouvrage à grandes arches à peu près égales.

1. — Voir APPENDICE, — Viaducs.

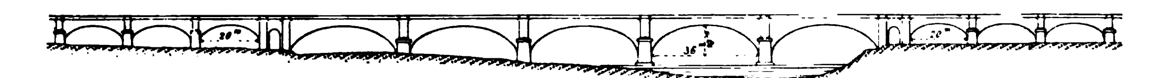
2. — A Paris, les bateaux avaient quelque difficulté à passer du pont Notre-Dame, qui avait 5 arches sous le pont au Change, qui n'en a que trois.
On vient de démolir le pont Notre-Dame.

3. — Pont des Invalides.

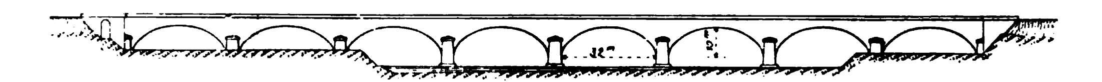
4. — Pont de Valence (I, p. 173): la pile du milieu était près et à la suite de celle d'un pont suspendu.

S'il est creusé dans une plaine submersible, on encadre l'ouvrage principal par des viaducs d'accès à plus petites arches (Pont de Marmande, f_1).

f_1 — Pont de Marmande, sur la Garonne — 0mm4



f_2 — Pont de Port-Sainte-Marie, sur la Garonne — 0mm4



C'est souvent une faute que de prolonger les grandes arches hors du lit mineur (Pont de Port-Sainte-Marie) (f_2).

Sur les creux de certaines vallées submersibles, on jette des ouvrages de décharge [5].

Des guideaux [6] entonnent l'eau sous les arches et arrêtent les courants latéraux.

On n'a réussi qu'à Gignac [7] une grande arche entre deux petites.

§ 3. — *OUVRAGES HAUTS. — VIADUCS* [8]

On franchira :

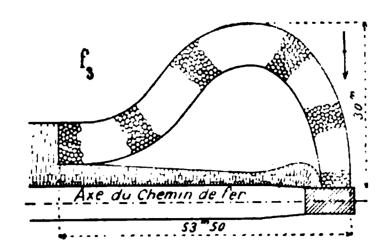
une vallée régulière, par un viaduc à arches égales ;

une vallée à pentes douces, brusquement creuse au milieu, par une grande arche ou plusieurs grandes arches au-dessus du creux, par de petites arches aux abords.

Si une vallée régulière ABCD (f_4) est coupée d'un creux profond, on jettera sur le creux une voûte CSD ; sur le sommet de la voûte, on appuiera une pile P.

Le creux est supprimé [9]. Au-dessus de AB, on n'a plus qu'un viaduc courant.

On a fait ainsi au viaduc de Fontpédrouse :



5. — On n'en a pas fait sur l'Allier.

6. — A Marmande (1881-1884) (f_1), puis à Belleperche (1895-1900), on a, pour guider le courant, épanoui le remblai : l'eau glisse sans trop affouiller. A l'amont des remblais, on plante des saules : ils créent un matelas d'eau morte qui les protège.

7. — I, p. 103. 8. — Voir : APPENDICE, Viaducs.

9. — SC, SD sont comme les jambes d'un homme dont le tronc est PS, ou comme les deux moitiés d'une pile unique fendue verticalement.

VIADUC DE FONTPÉDROUSE

Φ, — aval — Août 1908

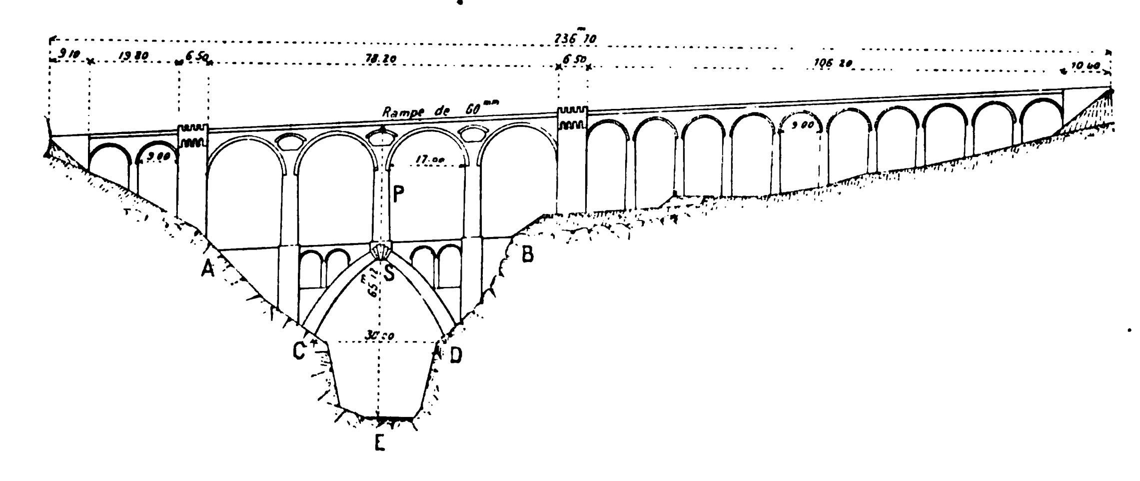


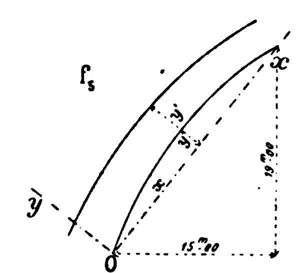
VIADUC sur la Têt, près de FONTPÉDROUSE

(PYRÉNÉES-ORIENTALES)

Ligne électrique à voie de 1ᵐ de Villefranche-de-Conflent à Bourg-Madame (1906-08)

f_4 — Élévation — 0mm6





1. Ogive.

Intrados : $y = 0{,}24587\, x\, [1 - 0{,}023385\, x - 0{,}000756\, x^2]$.

Extrados :

$y' = 3{,}806412\, [1 - 0{,}047199\, x - 0{,}0013736\, x^2 - 0{,}000045697\, x^3]$.

Les courbes de pression sont bien encadrées.

2. Matériaux. — Le pont est en granit.

L'ogive est, jusqu'à 4ᵐ de la clef, à mortier de chaux du Teil à 300ᵏ ; au-dessus, à mortier de ciment du Teil à 600ᵏ.

Le béton de la dalle est à 300ᵏ de ciment, 400ˡ de sable, 800ˡ de « gravillon ».

3. Pressions maxima,

en kg 0^m01^2, sous la surcharge.

	Ogive		Voûtes de 17ᵐ10		
				Retombée	
	Clef	Naissances	Clef	R. G.	R. D.
A la température du décintrement....	10ᵏ	12ᵏ	11ᵏ	8ᵏ	26ᵏ
A 10° au-dessus......................	17	14	31	8	11
A 10° au-dessous.....................	10	9	11	11	19

4. Dispositions en vue des variations de température. — La dalle est continue, sans coupure. Elle est ancrée dans les culées.

Les tympans sont chaînés par des feuillards.

En août 1911, après 3 ans, ni la dalle, ni les tympans, n'étaient fissurés.

10. D'après les tables de M. Pigeaud (Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 2ᵉ trimestre, p. 201 et suivantes)

Corps central

f_6 Élévation 2mm

f_7 Coupe en travers à la clef de l'ogive - 2mm

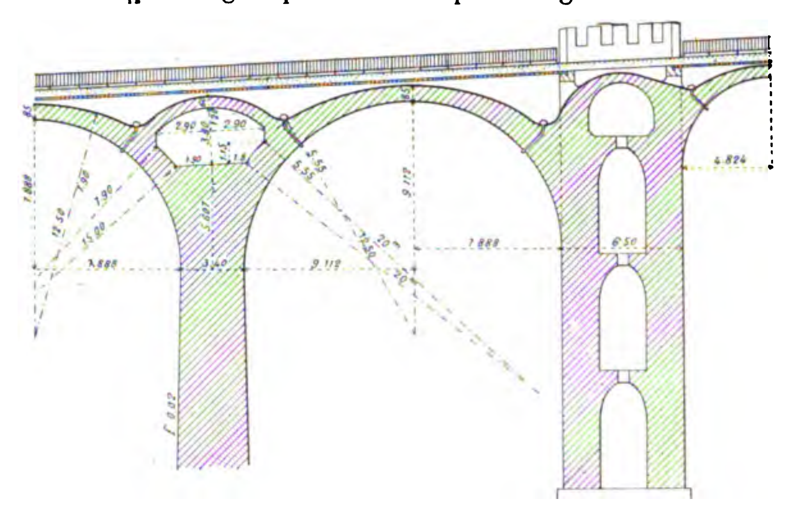
Couronnement des tours — 4mm

f_{10} — Élévation f_{11} — Coupe sur zz de f_{10}

Clef de l'ogive — 4mm

f_8 — Élévation f_9 — Coupe sur yy de f_8

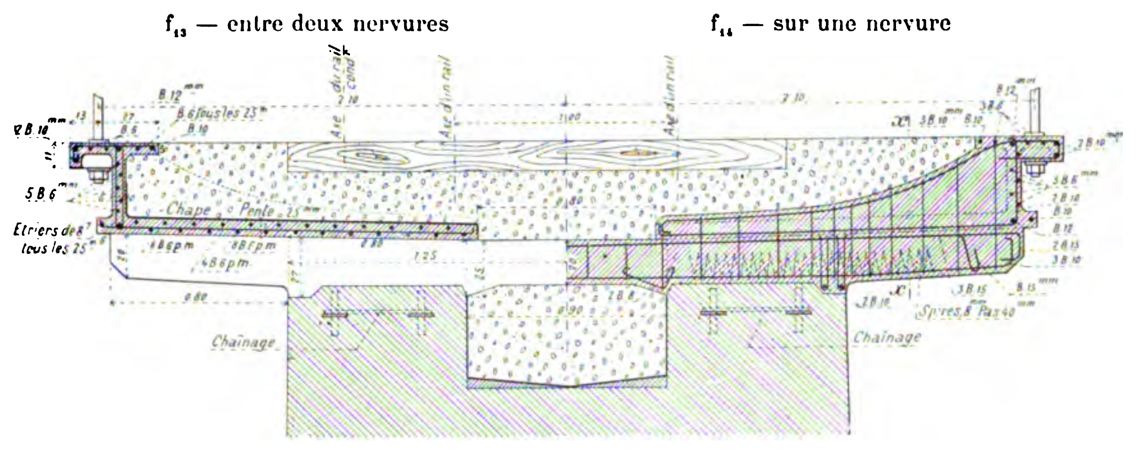
f_{12} — Étage supérieur — Coupe en long — 2mm5



Dalle en béton armé.

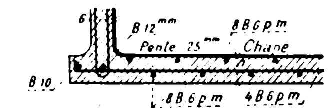
Demi-coupes en travers — 3cm

f_{13} — entre deux nervures f_{14} — sur une nervure

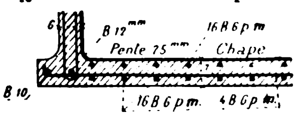


Hourdis — 5cm

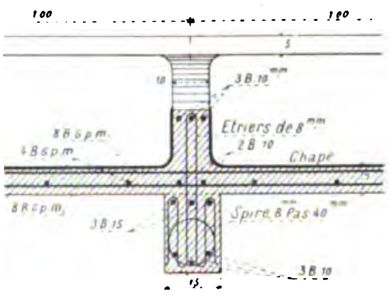
f_{15} — au-dessus du cerveau des voûtes



f_{16} — au-dessus des piles

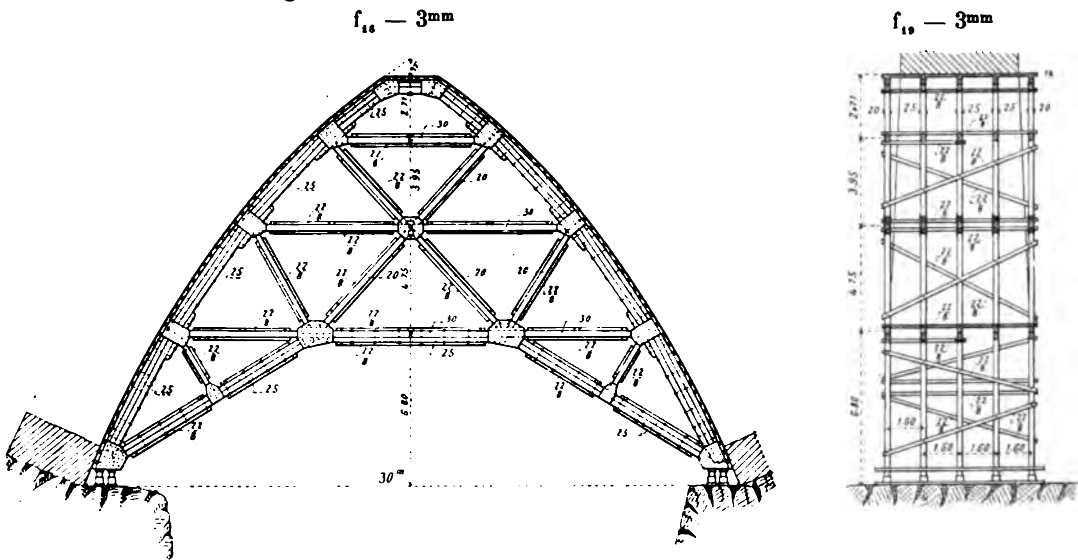


f_{17} — Coupe sur xx de f_{14} — 5cm



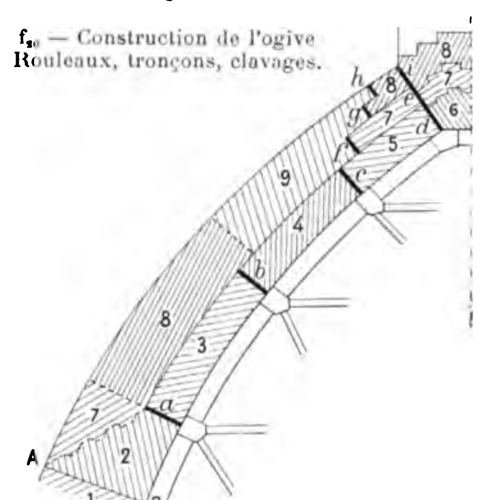
5. Cintre de l'ogive.

f_{18} — 3mm f_{19} — 3mm



6. Exécution des voûtes.

A. – Ogive. — On l'a construite à pleine épaisseur jusqu'à AB ; puis en deux rouleaux, dans l'ordre des chiffres de f_{20} : on ménageait en *a*, *b*,..... *i*, des joints secs, maintenus à l'intrados par des bandes de plomb de $25^{mm} \times 15^{mm}$, à l'extrados par des coins et barrettes en fer [11, 12] ; on les matait au mortier de ciment à l'état de terre humide :



f_{20} — Construction de l'ogive Rouleaux, tronçons, clavages.

dans l'ordre.........	*a*	*b*	*c*, *d*	*e*	*f*, *g*, *h*, *i*
après exécution des tronçons..............	4	5	6	7	9

B. – Voûtes de 17m. — En deux rouleaux ; à la clef et aux retombées, joints secs maintenus comme ceux de l'ogive, puis matés en commençant par la clef.

7. Décintrement de l'ogive (30 novembre 1907).

A. – État d'avancement du pont. — L'ogive portait : au sommet, toute la pile ; sur les reins, les voûtes d'évidement, clef et retombées non clavées [13].

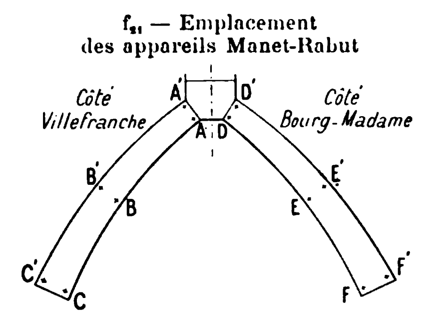
B. – Travail dans l'ogive, en kg/0m01². — On avait disposé, à l'amont et à l'aval, en A, B, C... D' E' F' (f_{21}), 24 appareils Manet-Rabut.

11. — Voir le pont de Ramounails (II, p. 188).

12. — Les coins et les barrettes étaient suiffés, pour empêcher le mortier d'y adhérer. Nous ne le faisons plus (Voir plus loin : Livre II, Titre III, Chap. II).
Les joints, à l'extrados, étaient bourrés de chiffons afin de rester propres.

13. — On les a matées après le décintrement de l'ogive.

f_{21} — Emplacement des appareils Manet-Rabut



Voici, d'après leurs indications, les efforts dus au décintrement, en supposant le coefficient d'élasticité du granit : E $\left(kg/\overline{0^m01}^2\right) = 5,5 \times \overline{10}^5$.

	A	B	C	A'	B'	C'	D	E	F	D'	E'	F'
amont...	12k	7k	5k	5k	10k	5k	14k5	4k5	»	3k5	7k5	»
aval.....	»	4,5	»	4,5	7	»	9,5	8	»	5	10	»
moyenne	12	5,7	5	4,7	8,5	5	12	6,2	»	4,2	8,7	»

La courbe des pressions dues au décintrement se rapproche de l'intrados à la clef, de l'extrados aux reins.

8. Dates.

Commencement des travaux		2 mai 1906
Construction de l'ogive	Commencement des maçonneries	6 novembre 1906 [14]
	Montage du cintre	24 mars - 7 avril 1907
	Achèvement du 1er rouleau	24 août 1907
	Achèvement du 2e rouleau	15 septembre 1907
	Décintrement	30 novembre 1907
Dalle en béton armé	Moulage des entretoises	1er avril - fin mai 1908
	Pose de la dalle	1er juin - fin juillet 1908
Achèvement des travaux		Décembre 1908
Ouverture à l'exploitation		Juillet 1910

9. Quantités et dépenses.

A. - *Totales.*

1° Sous la dalle en béton armé	*Décompte (rabais de 8 °/₀ déduit).*		
	Fouilles	12.309f62	
	Remplissage	681f29	
	Maçonnerie à mortier (10.352mc)	349.611f02	
	Chaînage des tympans	5.308f23	
	Chapes et gargouilles	2.213f54	
	Cintres	26.288f97	
	Indemnité allouée à l'entrepreneur	123.494f16	
	d_1 =	519.986f83	519.986f83
2° Dalle en béton armé	Béton (116mc72 à 70f)	8.170f12	
	Acier (21.531k à 0f65)	13.995f31	
	Enduit en ciment (220mq à 2f50)	550f	
	Coaltar (2 couches) (7296k à 0f25 et 0f15)	1.216f01	
	d_2 =	23.931f44	23.931f44
3° Garde-corps (11.456k à 0f85)	d_3 =		9.737f60
	D =		553.655f87

B - *Par unité.*

1° Ouvrage.— Prix	par m.q. de surface utile	D : 994mq14 [15]	=	556f91
	par m. c. de volume « utile »	D : 24.040mc8 [16]	=	23f03
	par m. c. de maçonnerie à mortier	D : 10.352mc	=	53f48

14. — Le mauvais temps arrêta à peu près complètement les travaux de décembre 1906 à mars 1907.
15. — Longueur entre abouts des garde-corps × Largeur entre garde-corps.
16. — Surface vue de l'élévation × Largeur entre garde-corps.

		Cube de béton	Poids de fer	Prix
2° Dalle seule en béton armé	par m. q. en plan.	0mc 117	21k6	24f1
	par m. c. de béton.	»	184k	205f

10. Personnel.

Projet : M. Séjourné, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Exécution : M. Séjourné. M. Lannusse, Ingénieur des Ponts et Chaussées. M. de Noëll, Chef de section.

Entrepreneurs : MM. Jean et Marc Sanfourche.

CHAPITRE II

OÙ ET POURQUOI
ON A FAIT DES PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

Art. 1. — Par économie. — On a jeté une grande arche :

par-dessus une rivière dans laquelle il eût été difficile de fonder : sol de fondation très bas[17] ou mauvais[18]; crues hautes, subites, fréquentes[19], surtout s'il est facile de fonder sur berges (rocher apparent[20], terrain imperméable[17]) ;

par-dessus une gorge profonde[21], à la place d'un viaduc à très hautes piles[22], surtout entre deux flancs escarpés qui suppriment murs ou viaducs d'accès[23].

Pour une grande voûte, construite sur cintre retroussé, la hauteur au-dessus du fond ne coûte rien[22].

Art. 2. — S'il faut réduire les remous. — S'il y a des villages dans la vallée submersible en amont du pont, et en général dans les villes, on supprimera, si on le peut, les appuis en rivière[24].

Art. 3. — Si la voie coupe en biais la rivière. — Dans ce cas, ou les piles en rivière seraient dans le sens du courant, mais sous des voûtes à appareil biais, — ou normales à la voie sous des voûtes droites, mais alors elles seraient obliques au courant et encombreraient le lit.

Φ_2



17. — Antoinette (II, p. 145). 18. — Bains-de-Lucques (III, p. 32).

19. — Collonges (I, p. 31), Oloron (I, p. 45), Gravona (II, p. 183), Bains de Lucques (III, p. 32), Morbegno (IV, p. 65), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242).

20. — Gravona (II, p. 183), Castelet (II, p. 130).

21. — A Ronda (Andalousie), on a, au XVIIIe siècle, franchi la gorge du Tajo par une voûte de 13m20 seulement (Φ_2). (Voir Tome II, p. 107, renvoi 1). — Date de la photographie : octobre 1893.

22. — Solis (I, p. 55), Wiesen (I, p. 235), Constantine (II, p. 107).

23. — Wäldlitobel (II, p. 157), Rothweinbach (II, p. 171). Steyrling (III, p. 137), Montanges (III, p. 62).

24. — Grasdorf (IV, p. 129), Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242).

Il vaut mieux, quand on le peut, jeter par-dessus la rivière une voûte droite d'assez grande portée pour que les culées soient en dehors du courant [25].

Art. 4. — Pour l'aspect. — Dans une ville, on doit faire beau et grand [26].

Quand le pont à construire est près d'une grande voûte, on ne peut, avec de plus grands moyens, se reconnaître inférieur aux anciens Ingénieurs [27].

Art. 5. — Quand on a voulu une grande arche [28].

CHAPITRE III

CHOIX DE L'INTRADOS

Art. 1. — Pleins cintres.

A. - A une seule arche. — On a jeté un plein cintre par-dessus des tranchées de rocher, entre des berges très inclinées [29] : il est, là, assez peu gracieux ; il lui faut préférer un arc qui leur soit à peu près normal.

B. - A plusieurs arches.

B_1 - *Ponts proprement dits.* — Quand les naissances sont près du sol ou de l'eau, il y a, pour l'aspect, trop de tympans. Sont ainsi les ponts romains de Rimini [30], de Salamanque [31], — assez malencontreusement imités au commencement du XIXe siècle (Sèvres, Φ_3 ; Agen ; Moissac, Φ_4 ;...)

Φ_3 — Pont de Sèvres — mai 1906



Φ_4 — Pont de Moissac — août 1908



Ces ponts bas, lourds, semblent faits pour porter quelque chose [32].

25. — Maretta, Prarolo (III, p. 93), Isola del Cantone (III, p. 98), Gour-Noir (III, p. 103), Pouch (III, p. 110), Freyssinet (III, p. 112), Jaremcze (III, p. 114), Diveria (III, p. 130), Castelet (II, p. 130), Escot (II, p. 174).

26. — Prince-Régent (IV, p. 239), Max-Joseph (IV, p. 242), Walnut Lane (II, p. 83), Rocky River (II, p. 95), Constantine (II, p. 107).

27. — Claix (III, p. 36), Lavaur (II, p. 135), Céret (II, p. 160). 28. — Plauen (III, p. 52).

29. — Pont de St Sauveur sur le Gave de Pau (I, 27).

30. — Φ_{12}, p. 111. 31. — Φ_{13}, p. 112.

32. — Projet de Palladio pour le pont du Rialto : le socle rappelle le pont de Rimini. Giovanni Rossi. *Le Fabbriche e i Disegni di Andrea Palladio*, Tome IV, p. 77, 78, 79, Tav. LII, LIII. Vicenza, 1796.

Il faut que les naissances soient franchement au-dessus de l'étiage [32].

Les pieds-droits doivent être, ou assez bas pour un pont, ou assez hauts pour un viaduc.

B_2 - *Viaducs.* — Voir l'APPENDICE.

Art. 2. — Ellipses. — Les naissances seront, comme celles d'un plein cintre, au-dessus de l'eau ; autrement, à la moindre crue, on ne voit plus qu'un pont à arcs très peu surbaissés, à naissances noyées, d'aspect désagréable [33], — mais pas trop haut : il ne faut pas jucher une ellipse sur de hauts pieds-droits : un pont en ellipse doit rester bas [34].

A. - A une arche. — Il y a de fort belles voûtes très peu surbaissées [35] ; on en peut aussi faire de très plates (Φ_5).

Φ_5 — Pont sur le Canal de Brienne, à Toulouse [36] — juillet 1912



32. — Pont en plein cintre de Sèvres (Φ_3), où le barrage de Suresnes a élevé l'eau à 2m10 au-dessus des naissances.

33. - Pont de l'Alma (I, p. 153), Viaduc du Point du Jour.

34. — Ceci, en dépit de quelques ponts récents : Ponts de la Reine Marguerite à Rome (Φ_6 p. 95) et à Turin (Φ_{10}, p. 110), Pont Cavour, à Rome (Φ_7, p. 95).

35. — Lavaur (Vieux Pont) (I, p. 97), Gignac (I, p. 103).

36. — Près du pont des Amidonniers.

B. – *A plusieurs arches.*

B_1. – Les naissances sont au-dessus des chaperons.



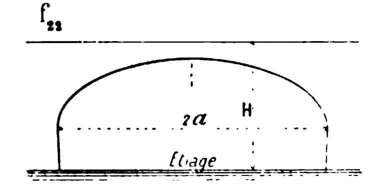
Φ_6 – Pont de la Reine Marguerite, à Rome - août 1908



Φ_7 – Pont Cavour, à Rome - août 1908

Ces ponts sont un peu juchés.

B_2 – Les naissances sont plus basses que les chaperons.



C'est l'emploi ordinaire et le meilleur, de l'ellipse.

On aura un joli pont en prenant :

$$2\,a = 2.5\ H\ (f_{22}),$$

et le surbaissement du 1/4.

Art. 3. — Arcs.

A. *Un seul grand arc.*

A_1. Arcs peu surbaissés. — L'œil accepte fort bien un grand arc à grande flèche, retombant sans pieds-droits sur le terrain naturel[37] : l'arc-en-ciel, peu surbaissé, est fort gracieux.

Il n'y faut pas de petits pieds-droits[38] : si on ne peut pas les supprimer tout-à-fait, on les élèvera aux dépens de la montée.

A_2. Arcs très surbaissés. — Il faut, dessous, assez d'air[39].

B. *Plusieurs arches.*

B_1. Meilleur surbaissement. — L'arc est disgracieux quand il n'est pas très surbaissé.

Un pont au 1/3 est très lourd : il faut au moins le 1/6.

Le meilleur surbaissement est 1/7,5, 1/8[40] ; on ne dépasse guère 1/10[41, 42].

Aux arches très tendues, il faut des culées très résistantes : le moindre recul est fort dangereux.

37. — Pont du Castelet, surbaissé à 1/2,94 (II, p. 130).
La partie au-dessus du sol du pont de Lavaur est surbaissée à 1/2,68 (II, p. 135). Vieux ponts de Nyons (II, p. 25), de Tournon (II, p. 35), de Claix (II, p. 42).

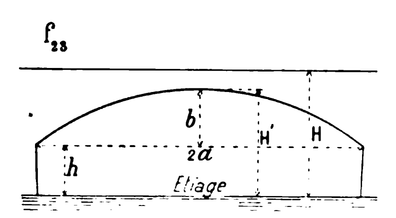
38. — Céret (II, p. 160), Jaremcze (III, p. 114),...

39. — Turin (III, p. 199), Claix (III, p. 36).

40. — Concorde (Φ_{30}, p. 117)

41. — Iéna.

42. — Le pont de Nemours (1795-1804), construit par Boistard sur les dessins de Perronet, est surbaissé au 1/15.
L'arche d'expérience de Souppes, de 37m88 d'ouverture, était surbaissée à 1/18 (III, p. 375).



B₂ – Rapport entre la portée et la hauteur. — Sous un pont à plusieurs arcs, il faut des pieds-droits ajustés, ni trop bas [43], ni trop hauts.

Le rapport de la hauteur *h* des pieds-droits à la hauteur sous clef H' est 0,56 à 4 ponts en arcs réussis [44].

Si on est libre et qu'on ne se préoccupe que de l'aspect, on prendra pour la portée 3 fois, 3 fois 1/2 la hauteur totale, et le surbaissement de 1/7,5 : on aura un joli pont.

Φ_8 — Pont de Tilsitt, sur la Saône, à Lyon (1864) [48 bis]



Si les crues y obligent, on tend les arcs et on accepte des pieds-droits trop hauts (Φ_8).

Art. 4. — Ogives. —

A. Ogive surhaussée. — C'est l'intrados des voûtes lourdement chargées à la clef [45].

On l'a adoptée aussi pour d'autres motifs.

Comme elle pousse peu, elle convenait pour des ponts du Moyen-Age, qui « *s'exécutaient arche par arche au fur et à mesure des ressources* [46] », chaque pile devant jouer successivement le rôle de culée; elle convient pour des voûtes d'élégissement longitudinal qui poussent les tympans [47, 48].

Grâce à sa hauteur, elle s'inscrit dans le toit pointu des cathédrales, dans l'angle de deux fortes rampes (Φ_9); elle assure un passage à travers une pile, un pilastre [49].

43. — Ponts du Moyen-Age en arcs peu surbaissés, avec naissances à l'étiage, sans pieds-droits. Ils gênent les crues et sont affouillés (Avignon, Saint-Esprit, La Guillotière, Ratisbonne,...)

Φ_{10}



44.

	$\sigma = \frac{b}{2a}$	$\varepsilon = \frac{h}{H'}$
Pont National, à Paris	1/7,5	0,55
Pont d'Austerlitz, à Paris	1/6,8	0,56
Pont de Roanne	1/8	0,56
Pont Corneille, à Rouen	1/7,5	0,57

45. — Fontpédrouse (V, p. 87).

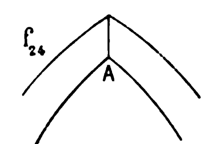
46. — Choisy, *Histoire de l'Architecture*, Tome II, p. 563.

47. — Chester (III, p. 29), Luxembourg (II, p. 67).

48. — On a, fort à tort, fait en ogive des ouvrages de la ligne d'Arles à Marseille (1850-54) (Φ_{10} — Pt 858k + 274 de Paris).

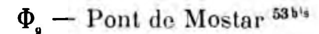
48 bis. — Date de la photographie : août 1907.

49. — Lavaur (II, p. 135), Luxembourg (II, p. 67).



Son cintre, peu chargé, est léger.

Comme il ne faut pas d'angle rentrant dans une pierre, il y a un joint au sommet A (f_{24}), ou bien, comme à Fontpédrouse[50], des clefs suppriment la pointe de l'intrados.


Φ_9 — Pont de Mostar[53bis]



B. - Ogive surbaissée[51]. — L'ogive très élégante et hardie du pont de la Trinité[52] ne fait bien que bas : elle a été fâcheusement employée au pont sur la rue d'Alésia à Paris[53].

L'angle du sommet motive et justifie un cartouche.

50. — V, p. 87.
51. — Pont de Martorell (III, p. 313).
52. — III, p. 340 ; V, Φ_8, p. 105.
53. — Ligne de Sceaux (III, p. 340).
53bis. — Date de la photographie : mai 1911.

TITRE XII

QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS

CHAPITRE I

ENSEMBLE DE L'OUVRAGE

Art. 1. — Caractère de l'architecture des ponts. — Un pont est fait pour qu'on passe dessus : c'est une œuvre d'utilité, et qui doit durer. Il doit être et paraître ajusté à son objet, solide, clair, simple, bien exécuté, sans vains ornements.

Ecoutons Perronet : « *Les grands Ponts étant.... des monuments qui peuvent* « *servir à faire connoître la magnificence et le génie d'une Nation, on ne saurait* « *trop s'occuper des moyens d'en perfectionner l'Architecture, qui peut d'ailleurs* « *être susceptible de variété, en conservant toujours dans les formes et la décoration,* « *le caractère de solidité qui lui est propre*[1] ».

....

« *Le pont* », — de la place Louis XV[2], — « *devant être construit dans la* « *Capitale,..... dans un lieu où la Nature & l'art ont répandu les plus beaux* « *aspects & des édifices de la plus grande magnificence, nous avons cru indispen-* « *sable de lui donner un caractère de décoration : nous n'y avons cependant* « *employé aucune espèce d'ornements de Sculpture, autant pour ne pas trop sortir* « *du genre de simplicité consacré à ces sortes de monuments, que pour ne point* « *affoiblir le caractère mâle qui convient à l'Architecture des Ponts*[3] ».

Art. 2. — Proportions. — Un pont en maçonnerie vaut par ses formes générales, ses grandes lignes, ses proportions, son intrados, par un heureux rapport de la portée à la hauteur, de la montée à la portée : la décoration n'y compte guère.

Chacun de ses éléments, voûtes, piles, culées, tympans, couronnement, doit avoir l'importance qui lui revient, ne pas entreprendre sur les autres, bien s'ajuster à l'ensemble.

Ils seront tous légers dans un pont léger ; tous lourds, dans un pont lourd.

On n'écrasera pas de légères voûtes par un lourd tympan, des piles grêles par des bandeaux à grand appareil, des tympans évidés par un parapet plein,....

Art. 3. — Adaptation aux lieux. — Le pont doit être adapté, non seulement aux lieux, mais au climat, aux monuments voisins, à la lumière, à la couleur locales : il doit sentir le terroir, avoir poussé naturellement sur le sol, n'avoir pas l'air importé, transplanté : il faut à Toulouse un pont toulousain.

1. — A la fin du Mémoire sur la *Réduction de l'épaisseur des Piles & sur la Courbure qu'il convient de donner aux Voûtes*, lu à l'Académie des Sciences le 12 novembre 1777.

Perronet : « *Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres* »,... Tome I, p. 112, Imprimerie Royale M.DCCLXXXII.

2. — Aujourd'hui : de la Concorde.

3. — *Loc. cit.*, *renvoi 1*, Tome II, p. 27, « *Pont de la place Louis XV* ».

Art. 4. — Viaducs. — La beauté d'un viaduc est dans le rapport de la portée à la hauteur, dans ses arêtes montantes et sa courbe d'intrados. Il faut que rien ne coupe les piles : pas de socles, pas de cordon aux naissances, pas de tailloirs aux contreforts, pas de chaînes d'angles aux arêtes des piles, pas de saillie des bandeaux sur la douelle ; pas d'autres lignes horizontales que celles du couronnement[4].

Art. 5. — Il ne faut pas se trop laisser conduire par les calculs. — Le projet fait, on s'assure qu'il tient : la science doit aider l'art, mais non pas l'étouffer. S'il manque de la matière quelque part, on en ajoute, mais sans blesser l'œil ; au besoin, on ne lui fait pas voir tout ce qu'il faut pour la stabilité : ainsi on cachera derrière un tympan plein une voûte trop épaisse aux reins ; s'il y en a trop, on en retranche, mais seulement ce que permet l'œil.

Art. 6. — Si on copie, ne pas faire de faute de copie. — Quand on se borne à copier, tout au moins faut-il faire s'accorder ce qu'on a emprunté : par exemple, ne pas juxtaposer des éléments d'un pont lourd et d'un pont léger.

On a trop copié depuis quelque cent ans.

Art. 7. — Se préoccuper toujours de l'aspect. — De tous les ouvrages, — je dis de tous, même des petits, — l'aspect importe : il n'est pas permis de faire laid.

C'est une étrange opinion que d'estimer cher ce qui est beau, bon marché ce qui est laid : on a fait laid et cher, beau et bon marché.

C'est dans les tracés qu'on économise : après, on ne fait plus que glaner, que grappiller. Ce qu'on gagne sur les ouvrages est misérable, et c'est faire voir bien peu de goût que les gâter pour si peu.

Art. 8. — Travailler toujours au progrès de l'art des ponts.

Tout n'a pas été fait, depuis quelque deux mille ans qu'on bâtit des ponts. Dans une grande ville, dans une capitale, on n'a pas le droit de faire un grand pont qui ne marque un progrès.

« *Il en résultera peut-être un surcroît de dépense, mais l'art des Ponts ne* « *saurait être trop perfectionné et il ne peut l'être que par de grands exemples ;* « *il en coûte plus pour l'ouvrage qu'on entreprend, mais il en coûte moins pour* « *ceux qui suivent*[5]. »

On a maintenant d'excellents mortiers ; on se joue des difficultés de fondations. Avec de plus grands moyens, a-t-on fait mieux que les anciens Ingénieurs ?

Art. 9. — Les Ingénieurs doivent savoir l'Architecture. — Les Savants qui ont fondé l'Ecole Polytechnique : Laplace, Monge,.... y ont institué un Cours d'Architecture.

A l'Ecole des Ponts et Chaussées, elle est aussi enseignée, — et fort bien.

4. — Appendice, Viaducs.
5. — Mémoire présenté au Roi par les Etats du Languedoc, 31 décembre 1779.

Sans doute, les Ingénieurs doivent avoir appris la Résistance des Matériaux : mais l'utile n'est pas tout.

La culture intellectuelle ne doit pas être rétrécie à l'utile seul, et ç'a été un crime que de lui sacrifier, — pour un temps, j'espère, — les vieilles Humanités.

CHAPITRE II

ÉLÉMENTS DE L'OUVRAGE

Art. 1. — Appareil. — Les épaisseurs des assises, la vigueur de l'appareil, le poids apparent des matériaux doivent aller en diminuant du sol au couronnement[6].

Art. 2. — Piles, culées. — Les pieds, les supports de l'ouvrage, doivent paraître tout particulièrement solides : pour en assurer l'œil, on les revêt d'assises épaisses, avec bossages : on leur donne du fruit.

Art. 3. — Voûtes. — Dans les ponts en maçonnerie, la voûte est tout.

On accentue vigoureusement ses têtes par une forte saillie sur les tympans, par l'appareil des voussoirs ; on les relève d'une archivolte ; on exagère les dimensions de la clef : on la fait saillir au-dessus et au-dessous du bandeau ; on la flanque de deux contre-clefs ; on y sculpte un cartouche.

Art. 4. — Tympans. — Les tympans, qui sont un poids sur le dos de la voûte, doivent être et paraître légers : on les revêt d'assises minces, de briques.

On se gardera, même dans une capitale, de les faire en pierres de taille de grand appareil.

On les traverse par des voûtes d'élégissement ; dans un pont long, on les raye de lignes d'ombre par des pilastres.

Art. 5. — Pilastres. — Au-dessus d'une pile, un pilastre sépare et encadre deux arches voisines ; sur une pile-culée, il peut séparer utilement une grande arche de petites voûtes d'accès.

Plaqué sur une culée pleine, il fait partie de la culée, il ne sépare rien.

On appareille un pilastre avec plus de vigueur que les tympans qu'il encadre, avec moins que les piles qu'il surmonte.

Art. 6. — Couronnement. — Pour regarder un pont, il faut reculer assez loin : on ne voit plus alors les petites moulures des chaperons, des corniches, des bahuts. Il en faut donc peu, mais de simples, nettes de loin, avec fortes saillies.

La hauteur et la saillie des corniches seront ajustées au pont.

On mettra sur un pont lourd, à tympans pleins, une corniche épaisse ; sur un pont léger, très évidé, un parapet très ajouré ; sur les culées, qui doivent toujours paraître robustes, un parapet plein.

6. — Au Pont de Saint-Loup (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat, 1911-14), la saillie des bossages est de 4 à 5^{cm} aux culées, 3 à 4^{cm} aux piles, 2^{cm} aux pilastres et aux bandeaux.

Voir aussi : APPENDICE, Viaducs.

TITRE XIII

RESPECT AUX VIEUX PONTS

On a gâté de vieux ponts pour les élargir.

Au pont de la Tournelle à Paris, au pont de la Guillotière à Lyon, il n'y a pas très grand dommage.

Mais on a failli porter la main sur le joli pont d'Entraygues[1].

Des Ingénieurs se sont rencontrés, qui ont proposé de démolir le beau pont de Toulouse[2], le seul du pays qu'ait laissé debout la terrible crue de 1875.

C'est une méchante action que de jeter par terre un fruit, une parure de la « terre des pères » : c'est nous diminuer.

On doit respecter les choses qui ont duré, surtout celles de chez nous.

Restons fidèles au passé, soutien du présent et garant de l'avenir, et gardons des Barbares nos vieux ponts, nos vieilles églises, toute notre vieille France... *Præteriti fides, spes futuri.*

1. — Φ_5, Φ_6, p. 34.

2. — Φ_7, p. 57 ; Φ_8, p. 84.

TITRE XIV

DÉCORATION DES PONTS

CHAPITRE I

QUELQUES RÉFLÉXIONS SUR LA DÉCORATION DES PONTS

Dans un pont, la décoration doit seulement distinguer les différents membres, marquer, accentuer le rôle et l'importance de chacun. Mais elle doit faire partie du corps même de l'ouvrage : elle ne doit pas en pouvoir être détachée : elle ne sera pas rapportée, accrochée, plaquée.

Elle doit être sobre, discrète, modeste, raisonnable, utile [1].

Elle sera à l'échelle du pont : du point d'où on le regarde, il faut qu'on la voie. Les Architectes qui ont décoré des ponts ont quelquefois oublié qu'un pont n'est pas une maison, ni un théâtre, qu'on regarde de tout près, et les ont chargés de petites choses qu'on ne voit pas de loin.

On doit se rendre très exactement compte [2] de l'effet que fera, réalisée en vraie grandeur, une disposition agréable en dessin : on a eu des désillusions.

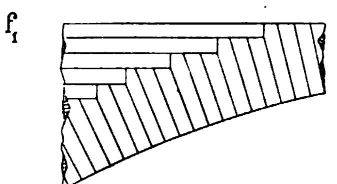
On n'est point obligé de traiter de même les deux têtes d'un pont [3, 4].

CHAPITRE II

TÊTES DES VOÛTES

§ 1. — *BANDEAUX A CROSSETTES*

Au XVIIIe siècle, dans le centre de la France, on a presque toujours extradossé les bandeaux à crossettes [5, 6] (f_1).



On a fait ainsi, en Italie dans les premiers ponts de chemin de fer [7], aux États-Unis [8], en Suisse [9], en Autriche [10], en Allemagne [11], en Angleterre [12].

1. — La coupe horizontale de quelques piles de Gauthey est en ovale. Les douelles de ses ponts de Navilly sur le Doubs et sur la Guyotte, qui ne sont vues que des pêcheurs et des grenouilles, sont à caissons : c'est raffiner hors de propos.

2. — Par des maquettes en plâtre, en terre, en pâte plastique... Il est bon d'avoir dans les bureaux des dessinateurs qui y soient exercés.

Perronet a fait faire beaucoup de maquettes : celles des ponts de Pont-Sainte-Maxence et de la Concorde sont à l'Ecole des Ponts-et-Chaussées.

3. — Pont des Amidonniers (I, p. 193).

4. — Pont de Saint-Loup sur l'Allier, 1910-1914 (Ligne de La Ferté-Hauterive à Gannat). La tête amont est revêtue de briques et coupée par des pilastres au-dessus des piles ; la tête aval est en moellons ordinaires à joints incertains, sans pilastres.

5. — *Ponts en anse de panier :* Blois, 1716-24 (Φ_1, p. 32 ; Φ_4, p. 107) ; Orléans, 1751-60 (Φ_1, p. 82 ; Φ_5, p. 107) ; Saumur, 1756-70 (Φ_{23}, p. 116) ; Mantes, 1757-65 (I, p. 160) ; Tours, 1764-77 (Φ_{25}, p. 116 ; Φ_{38}, p. 122) ; Neuilly, 1768-74 (Φ_9, p. 109 ; Φ_{39}, p. 122) ;...

6. — *Ponts en arc :* Fouchard, à Saumur, 1773-84 (Φ_{26}, p. 116) ; Pont-Sainte-Maxence, 1771-86 (p. 68, renvoi 25) ; Brunoy, 1785-87 (Φ_{24}, p. 116) ; Concorde, 1786-91 (Φ_{30}, p. 117) ; Nemours, 1795-1804 (p. 95, renvoi 42) ;...

7. — Prarolo (III, p. 93), Isola del Cantone, pont aval (III, p. 98).

8. — Cabin John (III, p. 75), Wheeling (III, p. 47). 9. — Nydeck (II, p. 51).

10. — St-Etienne (II, p. 55). 11. — Reichenbach (IV, p. 183).

12. — Londres (I, p. 147), Waterloo, à Londres (Φ_{18}, p. 113), Gloucester (I, p. 107), Putney (III, p. 239), Edouard VII (I, p. 182).

Les bandeaux à crossettes ne sont pas à conseiller.

Ils sont chers; la voûte et les tympans ne font qu'un, alors qu'il faudrait séparer ce qui porte de ce qui est porté : les intrados semblent découpés dans un mur plein.

§ 2. — *ARCHIVOLTES*

Art. 1. — Avantages. — L'archivolte accentue la voûte, la sépare franchement de ses tympans. C'est une excellente décoration : on ne l'a pas assez pratiquée.

Elle est particulièrement motivée sous tympans très évidés, parce qu'on voit alors toute l'épaisseur de la voûte aux reins : il est bon, pour l'œil, de la diviser.

Elle n'est pas justifiée dans un pont rustique, simple, au-dessus d'un bandeau à bossages.


Φ_1 — Pont St-Ange (Pont Ælins) à Rome [13] (138 ap. J.-C.)



Les Romains en ont fait grand usage dans leurs ponts (Φ_1), leurs portes, leurs arcs de triomphe, et aussi les Italiens de la Renaissance : ponts du Rialto (Φ_{29}, p. 117) et des Soupirs (Φ_{30}, p. 125) à Venise, pont Saint-Michel à Vicence, pont de la Trinité à Florence (Φ_2, p. 105).

En France, au XVIII[e] siècle, tandis que dans le Centre on supprimait toute saillie au bandeau, en Languedoc [14], en Bourgogne [15], revenant à la tradition romaine, on le détachait par de vigoureuses archivoltes.

13. — Date de la photographie : août 1908.

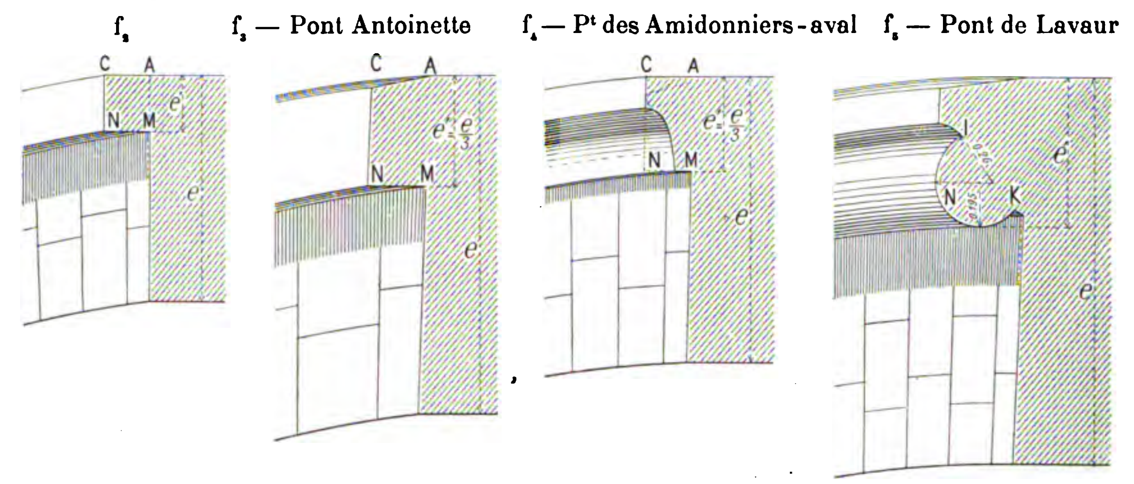
14. — Lavaur (I, p. 97), Gignac (I, p. 103).

15. — Ponts de Gauthey : Pont-Pierre, sur la Thalie, 1766-70; Ponts de la Barque sur la Vallière, 1777-80; de Gueugnon, sur l'Arroux, 1783-87; de Saint-Laurent, sur la Saône, à Chalon, aval, 1784-89; de Navilly, sur la Guyotte, 1786-89.



Art. 2. — Profils. — L'archivolte peut être un simple filet ACNM (f_2)[16], avec une pente AC (f_3)[17].

f_2 — f_3 — Pont Antoinette — f_4 — Pt des Amidonniers-aval — f_5 — Pont de Lavaur

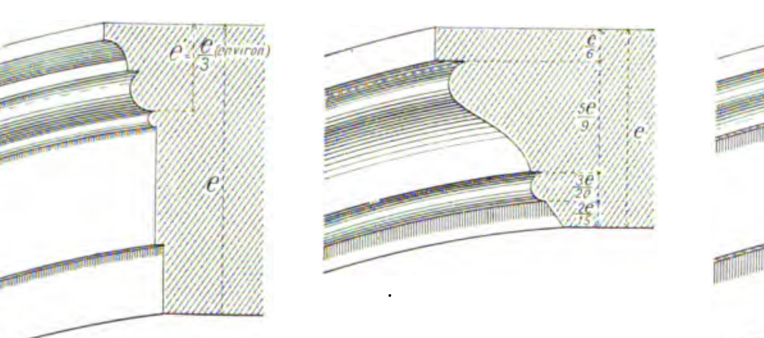


On y peut soit creuser un cavet (f_4)[18], soit dégager le tore INK (f_5) : c'est l'archivolte des porches romans, — peut-être un peu lourde à Lavaur[19] (f_5), puis à Valence[20, 21].

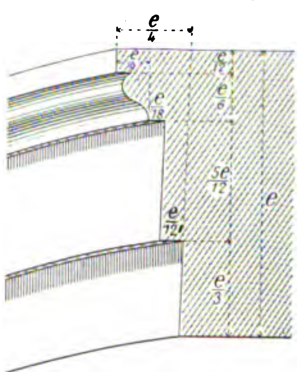
On adopte pour $\frac{e'}{e}$ (f_7) un rapport simple 1/3[22], 1/4 ; à 1/6, l'archivolte n'est plus qu'un mince filet[23].

On peut encore diviser le bandeau en tables[24] (f_6, f_7), orner de moulures toute l'archivolte (f_8).

f_6 - Pont St-Ange, à Rome[25] — f_8 - Pont de la Trinité, à Florence[26]



f_7 - Ponts de Luxembourg[27] et des Amidonniers[28]



Pour toutes ces archivoltes, il faut, entre les hauteurs de la moulure et des tables et l'épaisseur totale de la voûte, des rapports simples voisins de ceux du Vieux pont de Lavaur[29]. Si on s'en écarte trop, l'effet se perd.

16. — Pont de Narni, sur la Nera (Italie). Voir III, p. 317.
17. — Antoinette (II, p. 145), Gour-Noir (III, p. 103), Rébuzo (I, p. 48), Morbegno (IV, p. 65), Lusserat (III, p. 155).
18. — Porte de Pérouse. Amidonniers (face aval) (I, p. 196 IV, Pl. 3, f_{28}).
19. — II, p. 135. 20. — I, p. 173.
21. — On a relevé ainsi par des boudins romans des têtes de souterrain sur les lignes de Rodez à Millau, de Mende à Séverac, de Mantes à Argenteuil.
L'effet est excellent pour ceux à deux voies (souterrain de Meulan, ligne de Mantes à Argenteuil).
22. — Antoinette (II, p. 145). 23. — Narni. 24. — Gignac (I, p. 103).
25. — Eau-forte du Piranèse. — Mes photographies. 26. — Voir Φ_2, p. 105.
27. — II, p. 68 IV, Pl_2, f_{11}. 28. — I, p. 196 IV, Pl_3, f_{22}.
29. — I, p. 96 bis, Pl_1, f_5. On les a adoptés à Luxembourg, aux Amidonniers (f_7).

Art. 3. — Appareil. — Voir Titre I, p. 17, dernier alinéa.

Art. 4. — Fruit. — Quand, ce qui est le cas général, l'épaisseur de l'archivolte augmente à partir de la clef, il faut, de même, qu'augmente la saillie; elle aura ainsi plus de fruit que la voûte [30].

Φ_2 — Pont de la Trinité, à Florence [31]



Art. 5. — Archivoltes de voûtes en briques. — Avec la brique, il est facile de faire, à peu de frais, des archivoltes d'un bon effet [32] : on fait simplement ressauter chaque rouleau sur le rouleau inférieur.

Art. 6. — Arrêter ou recevoir l'archivolte. — Quand on fait une archivolte, il faut la recevoir, l'arrêter quelque part, ne pas la laisser suspendue.

A Lavaur [33], elle se retourne horizontalement à 60° de la clef; au pont Antoinette [34], elle s'enfonce dans le sol avec l'arc; à Luxembourg [35], elle est arrêtée par un sommier.

Les archivoltes et leur retour horizontal sont souvent sous des voûtes d'élégissement.

Si ce retour est bas, les piles d'élégissement sont hautes et s'appuient sur une partie fuyante de la voûte ; s'il est haut, il reste dessous trop de tympan, au détriment de l'aspect.

30. — Les fruits sont :

	Têtes	Archivoltes
au Pont de Lavaur	1/25	1/22
au Pont Antoinette	1/25	1/20

31. — Voir Tome III, p. 340. — Date de la photographie : juin 1908.

32. — Pont de Saint-Waast, sur l'Agoût (1882-84), Ligne de Montauban à Castres (Φ_{31}, p. 118).

33. — II, p. 135. 34. — II, p. 145. 35. — II, p. 67.

Si des pilastres encadrent la grande voûte, il faut que le retour horizontal soit assez long.

Il n'est pas facile d'accorder ces conditions opposées.

§ 3. — *BANDEAUX, AVEC TABLE INFÉRIEURE EN RETRAITE SUR LES TYMPANS*

Dans les ponts romains, plus tard en Languedoc, en Bourgogne, l'archivolte est en saillie sur les tympans.

Au moyen-âge, la voûte est souvent en rouleaux : le supérieur dans le plan du tympan, l'inférieur en retraite (Φ_3), [36, 37].

Φ_3 — Vieux pont de Prague (XIVe) [38]



Quelquefois, on a mis en encorbellement les tympans sur les têtes, les parapets sur les tympans [39] : la chaussée est plus large que la voûte.

§ 4. — *CLEFS PENDANTES. — CARTOUCHES*

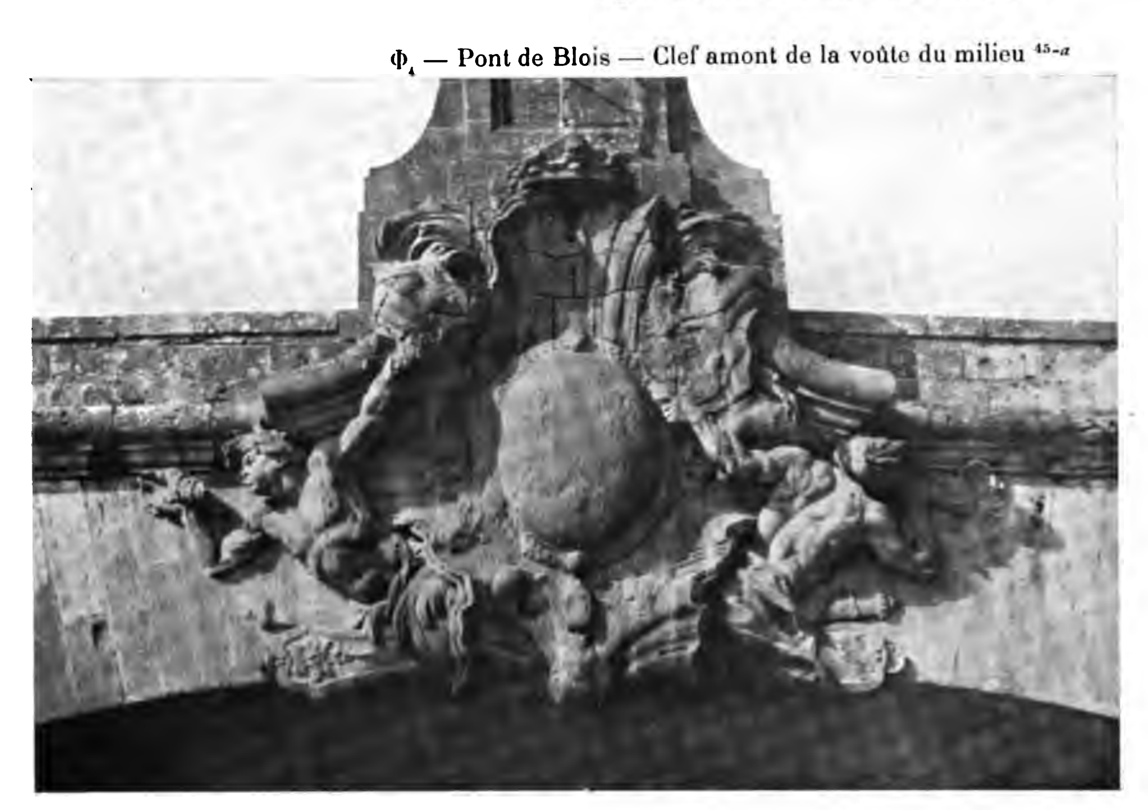
Dans les ponts ornés, on marque le milieu de la voûte par une clef et des contre-clefs [39 bis], soit plates [40], soit, mieux, sculptées [41] aux armes du pays, de la

36. — Dans les églises ogivales, les voûtes des nefs sont ainsi.
37. — Ponts de Soissons (Choisy : *Histoire de l'Architecture,* II, p. 564); d'Espalion ; d'Entraygues : sur la Truyère (Φ_5, Φ_6, p. 34), sur le Lot ; vieux pont à Chester,....
38. — Date de la photographie : Septembre 1904.
39. — Vieux pont de Pise (Choisy : *Histoire de l'Architecture,* tome II, p. 564).
39 *bis.* — Elles pourront relier utilement une corniche à une archivolte (Luxembourg, II, p. 68v), Amidonniers (I, p. 196IV).
40. — Aux vieux ponts de Lavaur (I, p. 97) et de Gignac (I, p. 103), on devait sculpter sur les clefs les armes du Languedoc.
41. — Ponts Montaudran et des Minimes à Toulouse sur le canal du Midi (Φ_{42}, Φ_{43}, p. 123).

province [42], de la ville, du souverain [43].

Voici le beau cartouche sculpté à Blois par Guillaume Coustou (1724) [44] :

Φ_4 — Pont de Blois — Clef amont de la voûte du milieu [45-a]



Si le pont a plusieurs arches, on ne mettra de cartouche qu'à la clef de la voûte centrale, pour bien marquer le milieu du pont, surtout s'il est en dos d'âne et a, alors, un sommet (Φ_5).

Φ_5 — Vieux pont d'Orléans [45-b]



On peut n'en mettre qu'à l'amont [46], ne pas faire le même à l'aval [47].

Les gens qui passent sur le pont voient le dos du cartouche : il y faut dessiner quelque chose [46, 48].

42. — Ornaisons (I, p. 65) ; Amidonniers (I, p. 193).

43. — Luxembourg (II, p. 67).

44. — La Révolution brisa la couronne royale, martela les fleurs de lys de l'écusson.
De Dartein. *Etudes sur les Ponts en pierre remarquables par leur décoration antérieurs au XIX*e* siècle*, vol. II, p. 92. "*Pont de Blois, par Jacques Gabriel et Pitron*, 1716-1724".

45. — Dates des photographies : *a*, avril 1914 ; *b*, août 1905.

46. — Vieux pont d'Orléans (1751-60).

47. — Blois, Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 196^{IV}, f_{17}, f_{19}).

48. — Luxembourg (II, p. 67).

Le cartouche doit être à l'échelle du pont (Φ_6) : on l'a parfois fait trop petit. A Toulouse [49], le cartouche central a 8^m de long.

Φ_6 — Aqueduc de Montpellier (1770–72) [50]



Aux ponts du Prince-Régent [51] et Max-Joseph [52] à Munich, on a suspendu des appliques de bronze.

§ 5. — *VOUSSURES*

Art. 1. — Pourquoi on a échancré par une voussure des têtes de ponts.

1° Pour mieux entonner les eaux : ceci n'est qu'un prétexte qui, au demeurant, ne les justifie pas à la tête aval.

2° Pour réduire l'avant-bec des piles : c'est une raison. — On a fait ainsi aux Amidonniers, seulement à la tête amont.

3° Pour l'aspect : c'est, je crois, fort à tort; de loin, d'un pont en ellipse avec voussure, on voit surtout les bandeaux en arc : on dirait d'un pont en arc renforcé aux reins : c'est lourd [53].

Tout au contraire, on a très heureusement ébrasé en bouche de cloche les arches latérales de Gignac [54].

49. — Amidonniers (I, p. 196^{IV}, f_{17}). 50. — Date de la photographie : juin 1914.
51. — IV, p. 239. 52. — IV, p. 242.
53. — Neuilly (Φ_4), Alma (I, p. 153), Empereur-François (I, p. 168), Valence (I, p. 173). 54. — I, p. 103.

4° Pour élargir de vieux ponts (Φ_7, Φ_8).

Φ_7 — Pont St-Laurent, à Chalon-s/S., amont[55, 60-a]



Φ_8 — Pont de Jurançon, sur le Gave de Pau[56, 60-b]



Art. 2. — Quels intrados a-t-on « voussurés » ? — On ne « voussure » guère que les ponts en ellipse[57], on « voussure » rarement les ponts en arc[58].



Φ_9 — Pont de Neuilly, sur la Seine[59, 60-c]



55. — Construit au xve siècle, élargi en 1785-89 par Gauthey. (De Dartein, loc. cit. renvoi 44. Vol. IV, p. 207.)

56. — Construit vers 1739, élargi en 1870-73.

57. — Tome I : Gloucester, p. 107 ; Annibal, p. 112 ; Diable, p. 116 ; Alma, p. 153 ; Empereur-François, à Prague, p. 168 ; Valence, p. 173 ; Amidonniers, p. 193.

58. — Mosca, à Turin (III, p. 199) ; pont Verdi, à Parme.

59. — Perronet : « *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres....* » Tome Ier, Paris, Imprimerie Royale, MDCCLXXXII, p. 1 à 65, Pl. I à XIX.

60. — Dates des photographies : *a*, mai 1909 ; *b*, octobre 1909 ; *c*, août 1901.

Art. 3. — Tracé des voussures. — J'ai indiqué comment on avait défini les cornes de vache de l'Alma [61] et celles, plus courtes, de Valence [62].

Φ_{10} — Pont de la Reine Marguerite, à Turin [71-a]



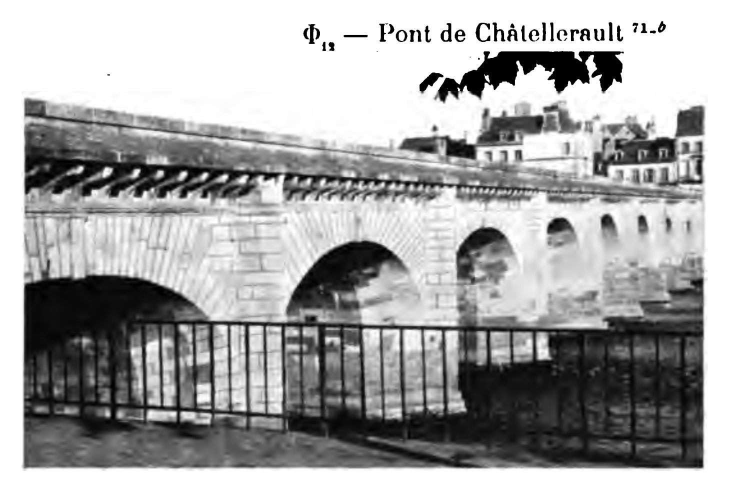
Φ_{11} — Pont Humbert Ier, à Rome [71-a]



Il faut que les surfaces soient bien régulières, sans creux ni bosses : on n'y a pas toujours réussi (Φ_{11}).

Les voussures compliquent l'appareil et le cintre ; elles exigent beaucoup de pierre de taille et coûtent très cher.

Φ_{12} — Pont de Châtellerault [71-b]



Art. 4. — La voussure est-elle française ? — On en voit au Pont-Neuf de Paris (1578-1607) (Φ_{32}, p. 119), au pont de Neuilly (1768-74) (Φ_{9}) imité à Gloucester [63], au pont en arc de Homps (1781-88) [64], au pont Mosca à Turin [65], imité d'un projet de Perronet, à Bordeaux (1819-1822), à Châtellerault [65 bis] (Φ_{12}), à Barbentane sur la Durance [66], à l'Alma [67], puis à Prague [68], à Valence [69].

On s'en est fort engoué en Italie [70].

61. — I, p. 153. 62. — I, p. 173. 63. — I, p. 107.

64. — De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, vol. III, p. 173. 65. — III, p. 199.

65 bis. — Pont de Châtellerault, 1564-1609. Directeur des travaux : de 1594 à 1606, Charles Androuet du Cerceau ; ensuite son fils René, architectes du Roi. — Les voussures dateraient de 1825-1830.

Bulletin et Mémoires de la Société des Antiquaires de l'Ouest. Tome XXIV (de la 2e série). Année 1900. « *Un Monument historique du XVIe siècle. Le Pont de Châtellerault, 1564-1830*, par M. Alfred Barbier. Mémoire : p. 1 à 85 ; pièces justificatives, p. 87 à 151.

66. — Ligne d'Avignon à Marseille (1846-49). 67. — I, p. 153. 68. — I, p. 168. 69. — I, p. 173.

70. — Ponts Annibal (I, p. 112), du Diable (I, p. 116) ; nouveaux ponts de Rome (Φ_{11}), de Turin (Φ_{10}).

71. — Dates des photographies : *a*-août 1908 ; *b*-mai 1907.

CHAPITRE III

MURS DE TÊTE

On y a creusé des niches [72] (Φ_{13}).

On a très souvent entouré d'un cadre un panneau en recul [73], avec ornements en relief (Φ_{14}) [74].

Φ_{13} — Pont de Rimini [75]



On a suspendu des couronnes [76], des écussons avec [77] ou sans [78] attributs, des médaillons [79] (Φ_{17}), sculpté des initiales [80], souvent trop maigres.

On a traversé les tympans d'arches ; on y a ouvert un œil-de-bœuf [81].

72. — Rimini ; Pont Marie, à Paris (XVIIe siècle) ; Gloucester (I, p. 107) ; Chester (III, p. 29) ; Bains-de-Lucques (III, p. 32) ;...

73. — Trinité (Φ_{8}, p. 105), Lavaur (Vieux Pont) (I, p. 97), Ballochmyle (I, p. 41), Calcio (III, p. 100), Bellefield (III, p. 49).

74. — Pont de Navilly sur le Doubs (Φ_{16}, p. 113).

75. — Date de la photographie : août 1908.

76. — Bercy, Louis-Philippe, à Paris.

77. — Austerlitz (Φ_{41}, p. 122).

78. — Iéna, Tilsitt (Φ_{8}, p. 96), Edouard VII (I, p. 182).

79. — Boucicaut (III, p. 243), Prince-Régent (IV, p. 239), Pont Isabelle, à Turin,...

80. — Saint-Michel ; Pont-au-Change ; Saint-Jean, à Saubusse ; Point-du-Jour,...

81. — Vieux Pont de Toulouse (Φ_{7}, p. 57) ; pont de l'Isle sur le Loir, près Bonneval (1710-1717).

Φ_{14} — Ponte Rotto, à Rome [82, 86-a]



Φ_{15} — Pont de Salamanque [86-b]



Pour de longs ouvrages, il est bon d'établir, au-dessus des piles, des pilastres : ils rayent d'une ligne d'ombre la surface monotone des tympans [83]; ils réunissent les pieds et le couronnement du pont; ils portent les dés du parapet, des candélabres, des statues,... On en voit dans des ponts romains (Φ_{15}) [84], dans des ponts du XVIIIe siècle [83], dans ceux de nos jours [85].

82. — Pont Palatin, restauré et décoré en 1575 par les Borghèse. (Leur chimère est sculptée dans les cadres). — Aujourd'hui *Ponte Rotto*.

De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, vol. IV, Introduction, p. XVII.

Au pont de Navilly (Φ_{16}), pour le relief des tympans, Gauthey parait s'être souvenu du pont Palatin.

83. — Tours (Φ_{25}, p. 116), Saumur (Φ_{23}, p. 116), Fouchard (Φ_{26}, p. 116),...

84. — Pont Saint-Ange (Φ_{1}, p. 103),...

85. — Londres (I, p. 147); Putney (III, p. 239); Marmande (Φ_{10}, p. 37); Tolbiac, à Paris;...

86. — Dates des photographies : *a* - août 1908; *b* - mai 1889.

Sur les pilastres, on sculpte un motif de décoration : on l'a souvent fait trop maigre, trop menu [87].

On peut varier à l'infini les formes et la décoration du motif au-dessus des becs : pyramides (Φ_{16}) [88, 90], colonnes portant un globe [89, 90], piédouche portant un écusson (Φ_{17}) [90] ; globe sur la pointe d'un chaperon [91], sur un piédouche à fût cannelé [92] ;...

Il y en a beaucoup à ne pas imiter, par exemple ce morceau de frise sur deux colonnes (Φ_{18}).

Dans ses ponts, Gauthey [90] a fait voir plus d'imagination que de goût. Retenons seulement qu'il ne s'est pas cantonné dans un type, qu'il a traité différemment chacun de ses 15 ponts : ceci est à imiter.

Φ_{16} — Pont de Navilly, sur le Doubs — amont [93-a]



Φ_{17} — Pont de Navilly, sur le Doubs — aval [93-a]



Φ_{18} — Pont de Waterloo, à Londres [93-b]



87. — Nouveau pont d'Ainay sur la Saône, à Lyon. — Pont de l'Université, sur le Rhône, à Lyon.

88. — Ponts des Echavannes (Φ_8, p. 57), Saint-Laurent à Chalon (Φ_7, p. 109).

89. — Pont de Cuisery (emporté en 1789).

90. — Ponts de Gauthey : De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, vol. IV, Introduction, p. XIV.

91. — Pont de Tours, aval (Φ_{33}, p. 116).

92. — Pont de Tours, amont.

93. — Dates des photographies : *a* - mai 1911 ; *b* - juin 1906.

Φ_{19} — Pont des Invalides, à Paris



Sur la pile, on a placé une statue (Φ_{19})[94], un groupe (Φ_{20}).

Au pont La Fayette (Φ_{20}), les sujets sont, de loin, indistincts, confus. Rien ne se dégage d'une tache générale sombre.

On voit bien les colonnes du pont Morand (Φ_{21}).

Ponts sur le Rhône à Lyon (1888-90)[95]

Φ_{20} — Pont La Fayette



Φ_{21} — Pont Morand



La décoration ne doit pas envahir l'ouvrage : elle doit rester modeste, effacée.

Il faut que les ornements soient à l'échelle du pont; qu'on les distingue de loin; qu'ils ne soient pas rapportés, mais fassent corps avec lui.

Je l'ai dit; je le redis.

CHAPITRE IV

COURONNEMENT

§ 1. — *PLINTHE ou CORNICHE*

L'épaisseur, la saillie, varient suivant l'ouvrage, sa hauteur, ses formes. Aux hauts viaducs, aux ponts lourds, il faut une corniche épaisse, donnant une ombre large.

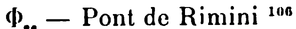
Une corniche sépare les tympans du parapet; elle couronne l'ouvrage et supporte l'attique, toujours plus léger : ces deux membres doivent être et paraître fort différents : s'ils ont même aspect, la plinthe ne se comprend plus.

On a dit que la plinthe indique à l'œil le niveau de la voie ou du trottoir. Je n'entends plus guère cette raison-là.

94. — Alma (I, p. 153); Mirabeau.
95. — Date des photographies : juin 1909.

Il y a de beaux profils de corniche : celui de Rimini (Φ_{22}), ceux à grand cavet des cathédrales des XIIe et XIIIe siècles [96], le gros boudin du XVIIIe [97, 98], posé sur un cavet (f_9) [99, 100], sur une doucine (f_{10}) [101].

On a placé la plinthe sur des modillons (Φ_{22}) [102], des corbeaux : on en règle au mieux l'aspect, la hauteur, l'espacement. On les arrête aux culées, ils ne les pourtournent pas.


Φ_{22} — Pont de Rimini [106]



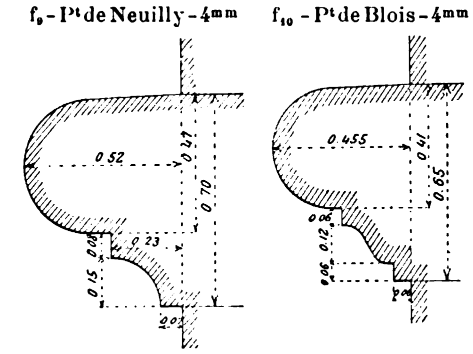
Nous supprimons maintenant la plinthe sur les culées [103] : c'est plus vigoureux, plus cru. Les culées ne sont pas l'ouvrage, elles en sont le cadre : un peu brutales, elles l'arrêtent bien.

Dans nombre de ponts du Moyen-âge [104], dans de plus récents [105], il n'y a pas de plinthe.

96. — Castelet (II, p. 131, f_3), Lavaur (II, p. 136, f_5), Antoinette (II, p. 145, f_6), Saint-Waast (Φ_{31}, p. 118). Voir aussi : APPENDICE, - Viaducs.

97. — Ornaisons (I, p. 64, f_3).

98. — Sa surface supérieure, presque horizontale, se couvre de mousse, de végétation, d'ordures.



99. — Ponts du XVIIIe siècle en Languedoc : des Minimes, sur le canal du Midi, à Toulouse (1760-1763) (Φ_{43}, p. 123), de Carbonne, sur la Garonne (1764-1780), de Gignac (I, p. 103). — De Dartein : *loc. cit. renvoi 44*. Vol. III.

100. — Neuilly (1768-74) (Φ_9, p. 109,- f_9), Luxembourg (II, p. 67), Amidonniers (I, p. 193).

101. — Blois (1716-1724) (f_{10},- Φ_4, p. 107).

102. — On en a un peu abusé (Ponts de Roanne, de Chalonnes, etc...).

103. — Luxembourg (II, p. 67), Fontpédrouse (Φ_1, p. 88 bis), La Croix (Φ_3, p. 78). — Voir APPENDICE, - Viaducs.

104. — Entraygues (Φ_5, Φ_6, p. 34), Tournon (II, p. 35), Claix (III, p. 36).

105. — Passages supérieurs : lignes de Lyon à Marseille, de Mende à Séverac, de Marvejols à Neussargues.

106. — Date de la photographie : août 1908.

§ 2. — *PARAPETS*

Art. 1. — Parapets pleins. — Sur un pont un peu long, un parapet à profil constant est monotone : on peut l'accidenter de dés en saillie, faire des encadrements de pierres de différentes couleurs, des panneaux de briques, etc...

Sur la paroi extérieure, on peut dessiner une « poste » (Φ_{23}), une grecque, plus ferme (Φ_{24}) [107].



Φ_{23} — Pont de Saumur [108, 110-a]



Φ_{24} — Pont de Brunoy [109, 110-b]

A Saumur, sur la Loire (1756–1770) (Φ_{23}), à Tours (1764–1777) (Φ_{25}), à Saumur, sur le Thouet (Pont Fouchard) (1773–1784) (Φ_{26}), de Voglie a adopté une disposition originale, intéressante, imitable :



Φ_{25} — Pont de Tours, aval [110-c]



Φ_{26} — Pont Fouchard [110-c]

Une large bande plate court d'un bout à l'autre du pont, embrassant corniche et parapet : elle s'appuie au droit de chaque pile sur une table verticale de même saillie. La bande et les tables font des



Φ_{27} [110-d]

107. — Voici (Φ_{27}) celle de la Promenade du Peyrou, à Montpellier (fin du XVIIIe siècle).

108. — De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, vol. II, p. 69.

109. — Sur l'Yères (1785-87) — Pont de Perronet — *id.*, p. 193.

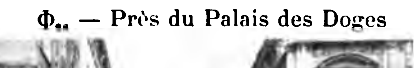
110. — Dates des photographies : *a*, août 1907 ; *b*, avril 1914 ; *c*, août 1907 ; *d*, juin 1914.

cadres rectangulaires contenant chaque arche, en manière « *d'arcade renfoncée* »[111].

Art. 2. — Parapets évidés.

— Un parapet plein au-dessus d'une plinthe ne se comprend guère : un attique doit être et paraître léger.

Ponts à Venise [114-a]



Φ_{28} — Près du Palais des Doges



Φ_{29} — Pont du Rialto

On couronne très heureusement un pont par une file de balustres[112], interrompue par des dés pleins[113].

Φ_{30} — Pont de la Concorde, à Paris (1786-91)[114-b]



Les balustres du pont de la Concorde sont d'un joli dessin, bien ferme.

111. — De Dartein, *loc. cit. renvoi 14*, Vol. II : Notice sur Jean de Voglie, p. 67 ; Pont de Tours, p. 117 ; Pont Fouchard, p. 159.

112. — Il faut très peu de vide entre les panses.

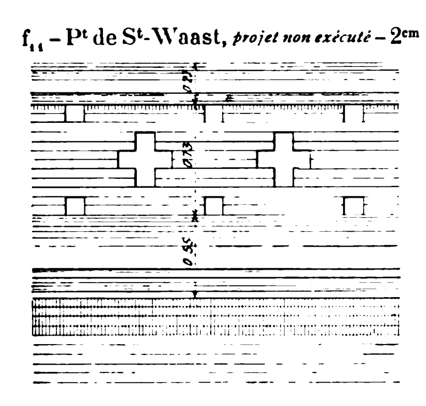
113. — Luxembourg (II, p. 68 ter, Pl_1, f_1).

114. — Dates des photographies : *a*, juin 1908 ; *b*, juillet 1902.

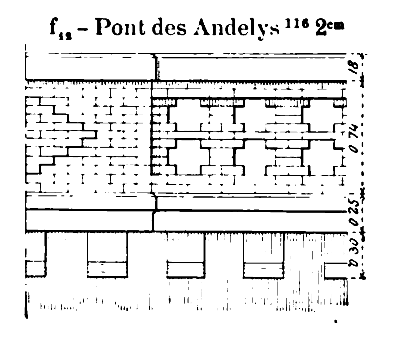
On ajoure très facilement un parapet en briques : petits piliers [115], fût troué de vides (f_{11}, f_{12}). Il y faut un peu de goût : on en a quelquefois manqué.

Si le pont est étroit, par exemple sous chemin de fer à une voie, et si l'on est à son niveau, on voit, à travers les jours du parapet d'une face, les pleins de l'autre.

f_{11} – Pt de St-Waast, *projet non exécuté* – 2cm



f_{12} – Pont des Andelys [116] 2cm



Un ouvrage avec un parapet trop léger en métal ne paraît pas couronné du tout : on ne perçoit qu'un « grisé », — et des dés, s'il y en a.

Il faut étoffer les garde-corps en métal [117].



Φ_{31} — Pont de Saint-Waast [118]



§ 3. — *REFUGES*

Il n'est pas aussi facile qu'il semble de disposer, sans dommage pour l'aspect, des refuges dans un parapet : il y faut quelque étude.

On ne peut accepter des refuges pleins que dans un parapet très étoffé.

Un dé plein est bien placé sur un contrefort, sur un pilastre surmontant un bec, sur des voûtains ou des consoles en pierre (Φ_{31}, f_{12}).

Si le garde-corps est léger, le mieux est de le conserver pour les niches, mais un peu plus nourri, et de le soutenir par des corbeaux discrets.

115. — Antoinette (II, p. 145); — Saint-Waast (Φ_{31}) : voir renvoi 32, p. 105.

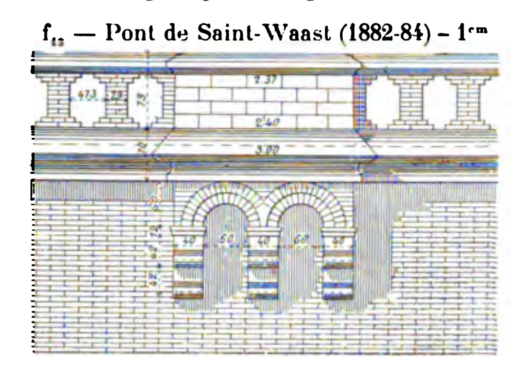
116. — Sur la Seine, 1872-73. — Voir p. 61, renvoi 54.

117. — Pont de l'Université, à Lyon.

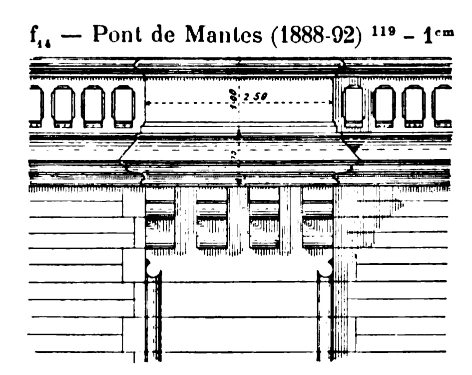
118. — Cliché Terpereau, Bordeaux.

Voici quelques dispositifs :

f_{13} — Pont de Saint-Waast (1882-84) - 1cm



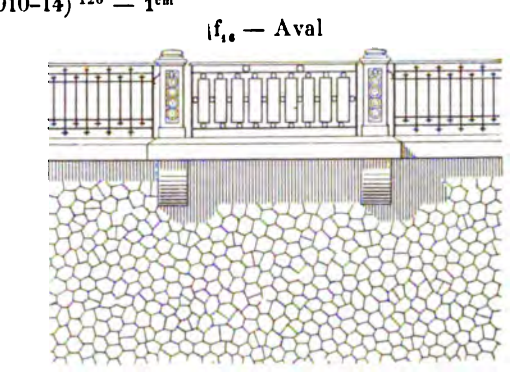
f_{14} — Pont de Mantes (1888-92) [119] - 1cm



Pont de Saint-Loup (1910-14) [120] — 1cm

f_{15} — Amont

f_{16} — Aval



Au Pont-Neuf, on a appuyé des niches rondes sur des becs pointus (Φ_{32}).

Φ_{32} — Pont-Neuf, à Paris (1578-1607) [121]



119. — Sur le bras navigable de la Seine. « *Monographie de la ligne d'Argenteuil à Mantes* », M. Bonnet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Paris, Dunod, Atlas, Pl. IX.

120. — Voir renvoi 21, p. 33. 121. — Date de la photographie : juillet 1902.

§ 4. — *STATUES SUR UN PONT*

Φ_{33} — Pont de Wurzbourg [124-a]



Pour être vues avec lui, elles doivent être à son échelle, c'est-à-dire énormes.

Pour être vues des gens qui passent sur le pont, elles doivent être à l'échelle des passants, c'est-à-dire n'être pas beaucoup plus grandes qu'un homme [122].

De petites statues, à bonne échelle de près, sont trop petites vues avec le pont (Φ_{33}) [122]. De grandes, à bonne échelle de loin, sont écrasantes de près [123].

Il n'est donc pas possible de placer sur un pont des statues, à voir à la fois des rives et du pont : il faut choisir.

Pont des Belles-Fontaines (1728), (sculptures de Guillaume Coustou). — Aval [124-b]

Φ_{34} — Ensemble



Φ_{35} — Détail



122. — Pont Saint-Ange à Rome (Φ_{1}, p. 103); Vieux Pont de Prague (Φ_{8}, p. 106); Trittenheim (III, p. 276)

123. — Les socles posés sur les colonnes du pont de la Concorde attendent depuis plus de cent ans d'avoir quelque chose à porter. Au lieu des pyramides de Perronet, en métal, creuses, à faces ajourées, on songea à y placer des statues de grands hommes. Douze étaient en place en 1836, mais elles écrasaient le pont. On les envoya à Versailles faire cortège à celle de Louis XIV.

124. — Dates des photographies : *a*, juillet 1909; *b*, mai 1907.

On peut placer de grandes statues sur les becs des piles, les passants ne les voient pas [125], ou encore aux entrées élargies des ponts, sur de hauts piédestaux [126].

Les statues doivent être du style du pont : on se gardera de placer des marbres du XVIIIe siècle sur un vieux pont [127].

On n'a pas fait cette erreur au pont des Belles-Fontaines [128] (Φ_{34}, Φ_{35}).

On peut trouver des motifs de décoration n'ayant pas, comme une statue, des dimensions obligées, une échelle propre, par exemple, les obélisques qui couronnent très heureusement le pont du Midi, sur le Rhône, à Lyon (Φ_{36}).

Φ_{36} — Pont du Midi, à Lyon (1889-91) [131-a]





Ils chargent, comme il convient, les pilastres qui prolongent les becs, et séparent les arches. Au pont voisin de l'Université, les pilastres ne portent que des candélabres : maigre charge sur cette large base.

§ 5. — *INSCRIPTIONS COMMÉMORATIVES*

Φ_{37} — Pont Cestius, à Rome (20 av. J.-C.) [131-b]



On a souvent inscrit la date de construction, les noms des souverains, des auteurs des ponts, sur des piédestaux [129], des colonnes, dans des cartouches, aux abouts des ponts [130], au sommet des arches (Pont Fabricius, à Rome), sur une partie surélevée de la face intérieure du parapet (Pont de Rimini, Pont Cestius, à Rome, Φ_{37},....)

125. — Alma (I, p. 153), Invalides (Φ_{19}, p. 113), Mirabeau,....
126. — Iéna, Saints-Pères.
127. — Wurzbourg (Φ_{33}).
128. — Sur l'Orge, près de Juvisy (1728). — De Dartein, *loc. cit. renvoi 44*, Vol. II, p. 107 à 116, Pl. 7 à 10.
129. — Pont des Belles-Fontaines (Φ_{35}).
130. — Pont Alexandre III, à Paris.
131. — Dates des photographies : *a*, juin 1909 ; *b*, août 1908.

CHAPITRE V

CULÉES. — ABORDS

Art. 1. — Abords. — Aux ponts des grandes villes, il faut d'amples abords. On trouvera de beaux modèles dans les ponts du XVIIIe siècle, les grands (Φ_{38}, Φ_{39}), les petits (Φ_{42}, Φ_{43}).

Φ_{38} — Pont de Tours, aval [133, 141-a]



Φ_{39} — Pont de Neuilly [134, 141-b]



On peut ébraser la dernière arche par une trompe [135], une voussure en pendentif (Φ_{38}).

Les tours rondes de Lavaur [136], de Turin [137], encadrent bien la grande voûte, mais conduisent mal la circulation.



Φ_{40} — Pont de Chantilly [141-c]



Φ_{41} — Pont d'Austerlitz [141-d]



Les courbes de Vizille [138], de Chantilly (Φ_{40}), d'Austerlitz (Φ_{41}), de Luxembourg [139], des Amidonniers [140], « entonnent » bien mieux la circulation dans le pont, résistent bien à la poussée des terres, font de belles lignes d'ombre.

133. — Voir p. 116 : Φ_{33} et renvoi 110.
134. — Voir p. 109 : Φ_{9} et renvoi 59.
135. — Pont-Royal, à Paris. 136. — I, p. 97.
137. — III, p. 199. 138. — I, p. 93.
139. — II, p. 67. 140. — I, p. 193.
141. — Dates des photographies : *a*, août 1907 ; *b*, août 1901 ; *c*, juillet 1903 ; *d*, juin 1901.



Φ_{42} — Pont Montaudran, à Toulouse [132]



Φ_{43} — Pont des Minimes, à Toulouse (1760-63) [132]



132. — Sur le Canal du Midi. — Date des photographies : juillet 1902.

Art. 2. — Têtes ou Portes de pont. — Il y avait des têtes de pont à Toulouse; il y en a au pont Flavien, sur la Touloubre, près de Saint-Chamas (Φ_{44}); au pont Valentré à Cahors (Φ_{45}), à Prague; il en reste à Châtellerault [141 bis].

Les Allemands en élèvent à l'entrée de leurs grands ponts métalliques [142].

C'est une intéressante décoration : on y pourrait revenir dans les grandes villes.



Φ_{44} — Pont Flavien



Φ_{45} — Pont Valentré (XIIIe)



Tout au moins peut-on annoncer le pont par des pyramides, des obélisques [143].

CHAPITRE VI

TOURS, OBÉLISQUES, SUR UN PONT



Φ_{46} – Pont d'Orthez (XIIe) [146-a]



Φ_{47} – Pont de Blois [146-b]

On a élevé quelquefois sur les ponts, des tours, probablement pour défendre le passage (Φ_{45}, Φ_{46}), un obélisque, une aiguille au sommet d'un dos d'âne (Φ_{47}) [144, 145].

141 bis. — Les deux tours de l'entrée rive gauche encadraient un joli bâtiment achevé en 1611 par René Androuet du Cerceau. On l'a démoli en 1824 : il ne laissait qu'un accès de 2m 92 à un pont de 21m.

Loc. cit. renvoi 65 bis, p. 109.

142. — Ponts sur le Rhin : de Bonn (1896-1898), de Worms (1898-1900), de Ruhrort-Homberg (1904-1907), de Cologne (1911),....

143. — Pont de Pont-Sainte-Maxence, sur l'Oise (voir p. 68, renvoi 25); Pont Alexandre III.

144. — Moulins (projet de Mansart), III, p. 306, f_1, f_2.

145. — Le pont construit fin du XVIIIe siècle, sur l'Oise, à Compiègne (3 anses de panier de 21m et 23m), portait, sur la clef de l'arche centrale, un obélisque surmonté d'une croix.

Belidor. « *Architecture hydraulique* », seconde partie, Tome II, Paris, MDCCLXXXX. Pl. LVII, p. 480.

146. — Dates des photographies : *a*, octobre 1909; *b*, avril 1914.

CHAPITRE VII

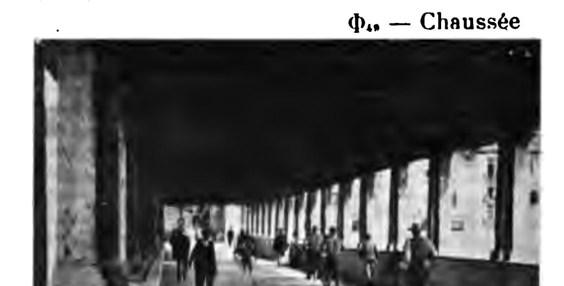
PONTS COUVERTS

Pont de Pavie (XIVe) [149]

Φ_{48} — Ensemble



Φ_{49} — Chaussée





Φ_{50} — Pont des Soupirs, à Venise [149]



On n'en fait plus. Pourquoi ? Un pont peut, cependant, porter quelque chose (Φ_{50}) [147].

Il y a plusieurs étages de circulation sur les grands ponts suspendus de New-York, sur le pont métallique de Passy.

On en peut concevoir sur les ponts en maçonnerie [148].

147. — Chenonceaux. — Projet de Palladio, pour le Pont du Rialto, à Venise. *(Loc. cit. renvoi 32, p. 93.)*

148. — Au Point-du-Jour, à Bercy, les étages de circulation ne sont pas superposés.

149. — Date des photographies : juin 1908.

CHAPITRE VIII

ÉTUDIER LES PONTS FRANÇAIS DU XVIII[E] SIÈCLE [150]

On ne saurait assez étudier les ponts français du XVIII[e] siècle : il y a là mieux et plus qu'un simple intérêt historique.

Sans doute, on ne fonderait plus sur pilotis les grands ponts de la Loire, ni par épuisements sous 26 pieds d'eau les piles-culées du Pont de Gignac; sans doute, on ne construira plus de grandes voûtes sur les cintres flexibles de Perronet.

Ce ne sont là que procédés d'exécution : ils ont passé, comme les coches d'eau et les chaises à porteur.

Mais ce qui n'a point vieilli, c'est la beauté et la variété des formes de nos vieux ponts, le choix judicieux de leur décoration; c'est l'ampleur, c'est la majesté solennelle de leurs accès : on ne les a pas égalées.

150. — On lira avec le plus grand profit les excellentes « *Études sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIX[e] siècle* », par M. de Dartein, — Paris, Béranger, 1907.

LIVRE II

COMMENT ON EXÉCUTE

UN PONT EN MAÇONNERIE

FONDATIONS — CINTRES — VOÛTES

FONDATIONS

§ 1. — *COMMENT ET SUR QUEL SOL ON A FONDÉ LES GRANDES VOUTES*[1]

Art. 1. — Piles

Les voûtes articulées sont en italiques.

Fondations — Procédé	Fondations — Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Tome	Voir pages — Tableau synopt.	Voir pages — Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation — MAX.	Pression admise sur le sol de fondation — moy.
Épuisements dans des batardeaux	Rocher	Victoria	Â Fr	II	198	201	1836-38	48^m77	7^m31 sous le thalweg	36^k	
	Calcaire fissuré	*Hochberg*	Â rte	IV	166	177	1899-1901	40			
	Mollasse (tuf)	Amidonniers	EE rte	I	188	193	1904-07	46	5.29	6.4[2]	
	Marne	*Cornelius*	Â rte	IV	166	180	1902-03	44	6.6	4.9	3^k7
	Marne	*Reichenbach*	Â rte	IV	168	183	1902-03	44	7.2	5.5	
	Marne	*Maximilien*	Â rte	IV	168	192	1903-05	45.87	5	5.5	
	Marne	*Wittelsbach*	Â rte	IV	170	199	1904-05	44	5	4.1	
	Marne	*Moulins-les-Metz*	Â rte	IV	170	202	1904-05	44		5	
	Argile	Edouard VII	E rte	I	144	182	1901-03	40.54	4.88	2.7	
Pilotis	Argile	Londres[3]	E rte	I	138	147	1824-31	46.33			
	Argile	Alma	E rte	I	138	153	1854-55	43			
	Argile	Big Muddy River	E Fr	I	222	225	1901-03	42.67			
	Argile	Gross-Kunzendorf	Â rte	III	232	267	»	40			
	Sable argileux affouillable	Boucicaut	Â rte	III	230	243	1888-90	40		3.3	
Havage	Rocher	Mehring	Â rte	III	230	252	1903-04	46			
	Argile	Putney	Â rte	III	230	239	1882-83	43.89			
	Gravier	*Garching*	E Fr	IV	92	95	1907-08	44.35	6.30	4.3	
Béton immergé	Poudingue	Mantes	E rte	I	140	160	1873-75	40	6		
	Gravier	Nogent-sur-Marne	C Fr	I	76	79	1855-56	50	8.50		7.1
	Gravier	Pont-sur-Yonne	E aq	I	210	213	1870-73	40			
	Gravier	*Mannheim (RD)*	Â rte	IV	172	206	1905-08	59.50			
Air comprimé	Schiste	Empereur-François	E rte	I	140	168	1898-1901	42.34	10.55	9.8	
	Calcaire	Avignon	Â rte	III	234	270	1905-09	40	14.03	12.3	
	Marne	Valence	E rte	I	142	173	1901-05	49.20	14.56		6.5
	Marne	Orléans	Â rte	III	232	255	1904-06	43.85	18.60	9.4[4]	
	Marne	Avignon	Â rte	III	234	270	1905-09	40	15.01		
	Argile	Verdun-sur-le-Doubs	E rte	I	140	165	1895-97	41	6.18		3.6
	Gravier	Avignon	Â rte	III	234	270	1905-09	40	16.34		
	Gravier	*Mannheim (RG)*	Â rte	IV	172	206	1905-08	59.50	5		

1. — Faute de renseignements, on n'a pas indiqué aux Tableaux, Art. 1 et 2, toutes les voûtes de 40^m ou plus.
2. — Sous les culées : 8^k9.
3. — Aux culées, on a incliné les pieux.
4. — Sous les culées : 17^k3.

Art. 2. — Culées[5]

Les voûtes articulées sont en italiques.

Fondations: Procédé	Fondations: Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Tome	Voir pages: Tableau synopt.	Voir pages: Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation: max.	Pression admise sur le sol de fondation: moy.
à sec	Gneiss	Cinuskel	$\hat{A}^{1}$ f^{r}	II	178	189	1910-12	46^{m}98		22^{k}9	20^{k}
	Granit	Plauen	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	14	52	1903-05	90		23.9	
		Gravona	$\hat{A}^{1}$ f^{r}	II	178	183	1884	43.53		14	
		Gour-Noir	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	80	103	1888-89	62		9.8	
		Gutach			84	122	1899-1900	64			
		Schwändeholzdobel			84	126	1899-1900	57			
		Langenbrand			88	152	1907-09	59		5.6	
	Micaschiste dur	Castelet	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	II	116	130	1882-83	41.20			
	Schiste cristallin	Solis	C^{1} f^{r}	I	52	55	1901-02	42		9.8	
	Schiste	Tuoi	$\hat{A}^{1}$ f^{r}	II	180	194	1911-12	47.71		22.9	20
	Grès	Guggersbach	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	14	59	1906	50.20		5	
	Calcaire	Wiesen	E_{h}^{1} f^{r}	I	232	235	1907-09	55		8.6	
		Escot	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	II	122	174	1907-09	56		14.3	
		Wallstrasse	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	IV	124	143	1904-05	65.45		8	
		Montanges	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	16	62	1908-09	80.29			
	Mollasse (tuf)	Lavaur	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	II	118	135	1882-84	61.50	2^{m}87	6.7	5.9
		Antoinette			118	145	1883-84	50	4.80	6.4	6.4
	Moraine glaciaire	Brent	C^{1} r^{te}	I	12	34	1899-1900	44			9
	Éboulis très compacts	Steyrling	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	86	137	1904-05	70		7.5	
	Éboulis compacts	Palmgraben	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	II	120	164	1904-05	49			
		Schalchgraben			120	168	1904-05	52			3.5
		Salcano	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	86	141	1904-06	85			4
	Éboulis peu compacts	Krenngraben	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	86	134	1904 05	40		3.5	
	Terre et pierrailles	Seythenex (RG)	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	III	170	177	1908-11	41.19		2	
Épuisements dans des batardeaux	Granulite	*Göhren*	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	IV	124	139	1903-04	60	7.5	8.9	8.2
	Schiste dur	Oloron (RG)	C^{1} F^{r}	I	38	45	1881-82	40	3		
		Rocky River	$\hat{A}^{1}\hat{A}^{1}$ r^{te}	II	62	95	1908-10	85.34	7.31	7.5	6.5
	Schiste tendre	Fium' Alto	E^{1} r^{te}	I	88	110	1862-63	40	2.55		
	Grès	Teinach	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	192	203	1882	46	8	5.5	
		Höfen		IV	38	41	1885	41	2	9	
	Tuf	Gignac	E^{1} r^{te}	I	86	103	1776-1810	48.42	9		
		Lusserat (RG)	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	88	155	1908-10	45.70		10	6.4
	Conglomérat solide	Krummenau	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	90	164	1910-11	63.26		12	
	Marne dure	*Illerbeuren*	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	IV	156	159	1893-94	59	4.80	3.4	
		Prince-Régent	$\hat{A}^{1}$ r^{te}		222	239	1900-01	63	6	4.8	
		Max-Joseph			222	242	1901-02	64	6.10	5	
	Argile	Diable (RG)	E^{1} r^{te}	I	88	116	1871-72	55	5.52	7.2	2.6
		Putney	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	III	230	239	1882-83	43.89			
	Gravier	Gloucester	E^{1} r^{te}	I	86	107	1826-27	45.72			
		Nydeck (arrière de la culée RD)	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	II	12	51	1840-44	45.90			
		Calcio	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	80	100	1877-78	42	4.20		
		Inzigkofen (RG)	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	IV	220	225	1895	47.90		3.7	
		Mannheim (RD)	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	IV	172	206	1905-08	59.50			
		Gräveneck	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	IV	210	213	1911-12	48		4.5	
	Sable et rognons de tuf	Alma (RG)	E^{n} r^{te}	I	138	153	1854-55	43	0.30		

5. — Les seuls ponts à plusieurs arches indiqués dans ce tableau sont ceux pour lesquels les culées sont fondées autrement ou sur autre sol que les piles.

Fondations: Procédé	Fondations: Sol	Ponts :	Intrados Voie portée	Tome	Voir pages: Tableau synopt.	Voir pages: Monographie	Dates	Plus grande portée	Profondeur MAXIMA sous l'étiage	Pression admise sur le sol de fondation: MAX.	Pression admise sur le sol de fondation: moy.
Pilotis	Argile	Diable (RD)	E^{1} r^{te}	I	88	116	1871-72	55^{m}		7^{k}2	2^{k}6
		Verdun-sur-le-Doubs	E^{n} r^{te}	I	140	165	1895-97	41			2.9
	Gravier	*Munderkingen (RG)* [6]	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	IV	52	55	1893	59		3	2.1
		Mannheim (RG)	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	IV	172	206	1905-08	59.50			
		Garching	E^{n} F^{r}	IV	92	95	1907-08	44.35	3^{k}28	3.2	
	Sable	Empereur-François	E^{n} r^{te}	I	140	168	1898-1901	42.34			
	Sable mouvant	Chester (arrière de la culée RD)	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	10	29	1833-34	60.96			
	Glaise et boue glaciaire	*Coulouvrenière (RG)* [6]	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	IV	78	81	1895-96	40		3.2	
		Vizille	E^{1} r^{te}	I	86	93	1751-66	41.08			
		Mantes	E^{n} r^{te}	I	140	160	1757-65	40			
		Victoria	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	II	198	201	1836-38	43.89			
		Mosca	$\hat{A}^{1}$ r^{te}	III	192	199	1834	45			
		Wengern			192	207	1904	50		3	
		Ziegenhals			194	208	1905	40			
		Schwusen [6]			194	213	1907	48			
		Kupferhammer [6]			196	214	1907	48			
		Krappitz [6]	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	III	232	265	1905	50			
Air comprimé	Calcaire	Avignon (RD)	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	III	234	270	1905-09	40	6		
	Craie tuffau	Lusserat (RD)	$\hat{A}^{1}$ F^{r}	III	88	155	1908-10	45.70	12.80	10	6.4
	Marne	Verdon	E^{1} F^{r}	I	128	133	1905-06	40	13.22	14	8
		Avignon (RG)	$\hat{A}^{n}$ r^{te}	III	234	270	1905-09	40	13.10		
	Gravier	Collonges (RG)	C^{1} r^{te}	I	10	31	1869-73	40	6		
		Valence	E^{n} r^{te}	I	142	173	1901-05	49.20	6.85	8.7	

Art. 3. — Ce qu'indiquent les tableaux précédents.

— On a fondé de grandes voûtes par tous les procédés, et à peu près sur tous les sols.

On fonderait aujourd'hui à l'air comprimé la plupart des ponts qu'on a fondés sur pilotis [7] ou sur béton immergé [8].

§ 2. — *IL FAUT AUX GRANDES VOUTES DES APPUIS INVARIABLES*

Il faut aux grandes voûtes des piles qui ne s'enfoncent pas, des culées qui ne s'enfoncent pas, qui ne reculent pas.

Sur les sols compressibles, on étale souvent la pression par des dalles en béton armé [9].

Sur un sol douteux, il est délicat, il peut être imprudent de faire une grande voûte.

6. — On y a incliné les pieux.
7. — Londres (I, 147); Alma (I, 153);....
8. — Nogent-sur-Marne (I, 79);....
9. — Walnut-Lane (II, 89); Palmgraben (II, 165); Schalchgraben (II, 169); Krenngraben (III, 135); Steyrling (III, 86); Salcano (III, 143); Seythenex (III, 178); Wengern (III, 207); Ziegenhals (III, 208); Krappitz (III, 265); Gross-Kunzendorf (III, 267).

Nous avons fait ainsi à 3 piles du viaduc de Morez (ligne de Morez à Saint-Claude, 1909-11). — Voir p. 48, renvoi 30.

TITRE II

CINTRES[1]

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

§ 1. — *BOIS. — ASSEMBLAGES*

Art. 1. — Choix des bois. — Généralement, on fait en chêne les pièces très chargées, ou qui le sont perpendiculairement à leurs fibres : semelles sur et sous les appareils de décintrement, chapeaux des palées doubles, sommiers d'une poutre armée[2], clefs des traits de Jupiter, coins, pistons des boîtes à sable; — en pin ou sapin, les autres[3].

On a quelquefois employé des bois en grume : pour tout le cintre[4], pour les étages inférieurs seulement[5].

Art. 2. — Ne pas trop presser le bois normalement à ses fibres. — Le bois résiste mal aux compressions transversales[6,7].

On n'y a pas toujours assez pris garde[8].

Pour empêcher qu'une pièce ne s'enfonce dans une autre, on intercale entre elles une feuille de zinc[9] ou de tôle[10].

Art. 3. — Assemblages des bois. — On assemble les pièces des cintres surtout avec des boulons, des équerres, des étriers, des plaques de tôle. Ces assemblages sont très simples, peuvent résister à la traction, réduisent la main-d'œuvre et les déchets.

Les couvre-joints en tôle de 5^{mm} à 7^{mm}, boulonnés, font des assemblages très rigides et solides.

1. — Dans tout ce titre, quand, à la suite d'un pont à voûtes de 40^m ou plus, il y a 2 pages citées, la 1re est celle du tableau synoptique, la 2e, celle de la monographie.

2. — Castelet (II, 117, 132); Luxembourg (II, 61, 72 bis).

3. — Étaient en châtaignier les cintres des ponts Annibal et du Diable (I, 89); en peuplier, quelques pièces secondaires au pont des Bains de Lucques (III, 11, 33).

4. — Annibal (I, 89); Diable (I, 89): Guggersbach (III, 15, 61).

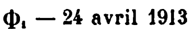
5. — Palmgraben (II, 121); Schalchgraben (II, 121); Krenngraben (III, 87).

6. — Viaduc de la Sitter. Expériences faites par la maison T. Bell, qui a construit la grande pile en bois sur laquelle on a monté la travée de 120^m.

Du sapin rouge, abattu en hiver un an avant l'emploi, s'est écrasé à 40^t, à 55^t par 0^m01^2.

Dans les calculs, on a admis comme effort-limite :
pression parallèle aux fibres : $80^t/0^m01^2$;
pression normale : $12^t/0^m01^2$.

Schweizerische Bauzeitung, 15 octobre 1910, p. 205 à 210 : « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* », von den Ingenieuren A. Acatos, L. Lüchinger, E. Ackermann.


Φ_1 — 24 avril 1913



7. — Pour construire la ligne de Frasne à Vallorbe, on a dû dériver le Doubs en souterrain, sous une falaise : des longrines de 0^m30 d'épaisseur, coiffant les poteaux d'appui, ont été réduites à 0^m05 (Φ_1).

8. — Pont Cornélius (IV, 182).

9. — Ponts du Castelet (II, 132), de Lavaur (II, 137), Antoinette (II, 146),....

10. — Pont du Castelet (II, 132); pont de Wiesen (I, 241).

Art. 4. — Ne pas tirer les assemblages des bois : les comprimer. — Une pièce de bois résiste bien à la compression et à la traction; mais les assemblages, eux, ne résistent bien qu'à la compression.

Dans un cintre bien étudié, sauf les vaux et les couchis qui sont fléchis, les pièces maîtresses des fermes travaillent de bout à la compression simple.

Pour une pièce très tendue, on emploiera un tirant en acier, — mieux, un câble dont on règle la tension.

§ 2. — *FERMES*

Art. 1. — Nombre et écartement. — Presque toujours, les fermes sont espacées d'environ 1m50; on écarte un peu plus celles de rive qui ne supportent que la moitié de la charge, et on en diminue l'épaisseur[11].

En général, il y en a :

4 pour un pont de chemin de fer à une voie (4m50 entre garde-corps);
6 pour un pont à deux voies (8m entre garde-corps);
3 pour un pont sous une voie étroite, — pour un pont-route de moins de 4m.

Art. 2. — Épaisseur. — Pour les grands cintres, 0m20 à 0m25[11].

Art. 3. — Tracé. — On peut imiter ce qui a été fait, mais il faut se bien rendre compte de ce que portera chaque pièce.

On se gardera de placer des pièces au hasard : non seulement on paie du bois inutile, mais on fatigue les autres, et, quelquefois, on introduit dans les principales des efforts dangereux.

On peut avoir un très mauvais cintre avec beaucoup de bois.

Art. 4. — Vaux. — Un vau haut se fait en deux[12], en trois pièces[13], bien boulonnées.

Solidement assemblés entre eux par des plaques de tôle, des vaux hauts sont comme les voussoirs d'une voûte de bois[14].

§ 3. — *PIÈCES TRANSVERSALES*

Art. 1. — Contreventement. — On contrevente chaque ferme dans son plan par des moises longitudinales, des écharpes; mais ce sont surtout les fermes entre elles qu'il faut solidement contreventer.

Elles sont calculées et construites comme devant rester dans un plan vertical : il faut les y maintenir, c'est-à-dire les empêcher de se voiler, de gauchir, de flamber.

11. — Voir plus loin les tableaux synoptiques, p. 136 à 141, p. 144, 145, 148.
12. — Antoinette (II, 144 bis); Sornin (p. 146, art. 3).
13. — Castelet (II, 132); Ramounails (II, 187).
14. — Ramounails (II, 188). L'arc des vaux a pris la moitié de la charge sur le cintre.

Un grand cintre étroit peut flamber : il faut le contreventer à outrance [15].

Les croix de Saint-André font un excellent contreventement, à condition que les deux bras de la croix ne soient ni trop fermés, ni trop ouverts ; on contrevente aussi par de simples écharpes, par des moises horizontales.

On ne calcule pas les pièces de contreventement : le sens pratique, c'est-à-dire le bon sens, indique leur place et leurs dimensions.

Quand on doute, il vaut mieux en mettre trop, mettre les pièces plus faibles et les multiplier.

Art. 2. — Couchis. — Pour les moyens ouvrages, on pose jointifs des madriers de 7 à 8^c d'épaisseur ou des poutrelles carrées.

Pour les couchis des grands, on prendra : $\frac{a}{b} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, soit $\frac{5}{7}$ [16].

Avec ce rapport, on a la résistance maxima d'une pièce fléchie découpée dans un bois rond : j'ai presque toujours pris 10^c et 14^c.

On calcule l'espacement e des couchis suivant l'écartement des fermes et la charge.

Art. 3. — Platelage. — On cloue sur les couchis, à angle droit sur eux, des voliges minces jointives de 2^c à 2^c 1/2.

Sur ce plancher continu, on trace les lignes d'assises, les courbes de tête, les queues des voussoirs de tête, la place des joints secs, l'épure d'un pont biais.

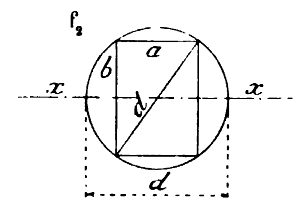
CHAPITRE II

CINTRES FIXES

C'EST-A-DIRE BIEN APPUYÉS SUR LE SOL ENTRE LES NAISSANCES

§ 1. — *QUELLES VOÛTES FAIT-ON SUR CINTRES FIXES ?*

Toutes celles pour lesquelles il est facile de prendre appui sur le sol, — spécialement les arcs et les ellipses surbaissés, qui, presque toujours, en sont près.



15. — Luxembourg (II, p. 72 ter).

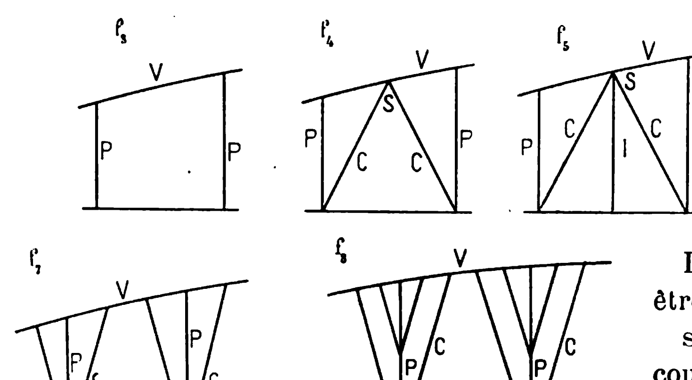
16. — Le couple de flexion par rapport à xx est (f₂) :

$$\mathfrak{M} = \frac{RI}{\frac{b}{2}} = \frac{1}{6} R\, ab^2 = \frac{1}{6} R\, a\,(d^2 - a^2)$$

Il est maximum pour $a^2 = \frac{d^2}{3}$, $\quad b = a\sqrt{2}$

§ 2. — *ON PEUT CLASSER LES CINTRES FIXES SUIVANT LA DISPOSITION DES MAITRESSES PIÈCES SOUTENANT LA COURONNE DES VAUX*

Art. 1. — Cintres à poteaux. Type P. — Les vaux sont portés par deux poteaux verticaux P (f_3).

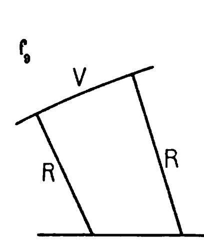


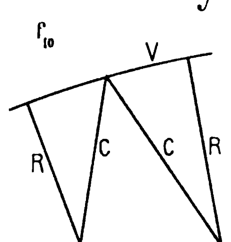
Entre les poteaux, ils peuvent être soutenus :

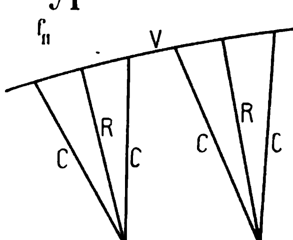
soit par des contrefiches concourantes (type poteaux et triangles PT, f_4, f_5, f_6) ; — le sommet S soutient ou le milieu d'un vau, ou l'about de deux vaux ; — on y peut suspendre un poinçon I qui porte une moise horizontale *m* ou plusieurs ; — il y a souvent deux systèmes de triangles CC′ (f_6) ;

soit par des contrefiches isolées (type PC), — système unique (f_7), ou double (f_8) : elles travaillent isolément ; elles ne s'entr'aident pas.

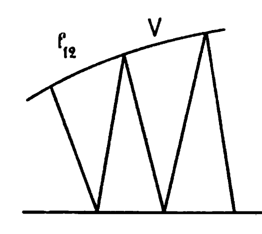
Art. 2. — Cintres à rayons. Type R. — Les vaux sont portés par deux pièces R, dirigées suivant le rayon de l'intrados (f_9).

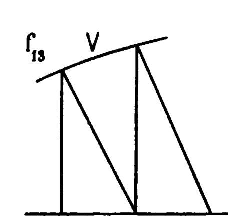






Entre les rayons R, ils peuvent être soutenus par des contrefiches, soit concourantes (type rayons et triangles RT, f_{10}), soit isolées (RC, f_{11}).





Art. 3. — Cintres à treillis. — On en a fait en W (f_{12}), en N (f_{13}).

Art. 4. — Cintres à contrefiches rayonnant de piles provisoires (f_{14}). — A partir de piles provisoires, on a étalé en éventail des contrefiches.

Mais il a fallu fonder ces piles : on ne comprend guère que sur elles on n'appuie pas un ouvrage à plusieurs arches.

Art. 5. — Cintres à un ou plus d'un étage. — Pour les voûtes basses, il n'y a qu'un étage : il repose directement sur les appuis. Pour les hautes, il y en a deux, trois.

§ 3. — *CINTRES FIXES A POTEAUX* (**P**)

Intrados	Ponts :	Voir: Tome	Voir: page: Tableau synoptique	Voir: page: Monographie	Portée	Montée	Fermes: Epaisseur en 0m01	Fermes: Ecartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle [17]: Cube de bois	Par m. q. de douelle [17]: Poids de fer	Par m. q. de douelle [17]: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement

Art. 1. — Poteaux seuls (P) et nombreux étages.

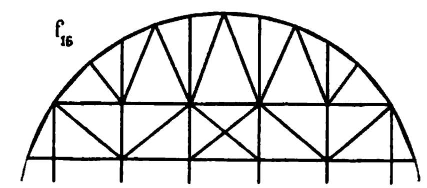
Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs peu surbaissés à grande flèche	Crespano	II	11	47	40m40	16m		1m40			48f60	530mm	370mm
	Walnut-Lane	II	63	88	70.71	21.41	25c	1.524	1m³20	202k			95.3
									(les deux voûtes ont été construites sur le même cintre.)				

Art. 2. — Poteaux et triangles (PT).

A. — Sans poinçons.

1° — Un étage [18] (f_{15}).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Ellipse	Signac	I	129	132	40	12.31	30	1.25	0.71	3	54.80		
Arcs assez surbaissés	Seythenex	III	171	179	39.66	10.05	20	1.25	0.63	11.1	63.50	50	29
	Losde [19]				30.60	6.30	20	1.40	0.486	7.61	28.50		
Arcs très surbaissés	Lays-sur-le-Doubs [20]				26	3.48			0.445	4.82	30.80		
	Arciat [20]				31	4.35			0.491	5.97	35.60		
	Digoin [20]				26	3.50	25-30	1.44	0.595	9.37	41.90		
	Morbegno [21]	IV	63	71	70	10	25	1.40				120	
	Andrézieux				36.45 33.30	4.70 4	rive 16 interm 18	1.65	0.52	12.24	32		



2° — Deux étages [22] (f_{16}).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Plein cintre	Rébuzo	I	39	49	40	20	25	1.57	0.80	17.3	31.90		22
Arc très surbaissé	Illerbeuren (articulé)	IV	157	160	59 *57.16* entre rotules	*9.82*	étage supr 20 étage infr 26	1.28	0.89		75.80	60	15 jusqu'au clavage

B. — Avec poinçons.

Un étage et deux systèmes de triangles (type Montlouis) (f_{17}).

Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Ellipses	Bléré [23]				24	6.43	25		0.662	12.22	47.96		
	Chalonnes [24]				30	7.5	25		0.729	10.16			28 à 71
	Marmande				36	10	30		0.669	10.92	80.05		37 à 68
	Le Verdon	I	129	134	40	10	25	1.40	0.39	10	39.10	50	44
Arcs assez surbaissé	Claix	III	13	37	52	8.05	35	1.50	0.74		68.90		4
Arcs très surbaissés	Boucicaut	III	231	246	40	5	25	1.60	0.75	7.88	35.93		
	Argentat [25]				32.64	5.47	25	1.25	0.90	16.24	60.33		

17. — Voir à l'Avertissement, en tête des tomes I à IV, comment est calculée la surface de douelle.
18. — Pont sur l'Aude de la station de Saint-Martin-Lys (Ligne de Quillan à Rivesaltes, 1896-97) : portée, 34m ; montée, 8m86.
19. — Sur l'Ariège (Ligne de Tarascon à Ax, 1882-83).
20. — Saône-et-Loire.
21. — Deux systèmes de triangles (comme au croquis f_{17}).
22. — Plus de 2 étages : Pleins cintres de Nogent-sur-Marne (I, 77, 81); de Ballochmyle (I, 39, 42); arc assez surbaissé de Jamna (III, 83, 119).
23. — Sur le Cher (Route Nationale n° 76).
24. — Morandière : Montlouis, Pl. 130, fig. 1-2 ; Chalonnes, Nantes, Pl. 131, fig. 1.
25. — Route Nationale n° 120 de Rodez à Limoges (1893).

Art. 3. — Poteaux et contrefiches isolées (PC).

Intrados	Ponts :	Voir: Tome	Voir: page: Tableau synoptique	Voir: page: Monographie	Portée *Portée entre articulations*	Montée *Montée entre articulations*	Fermes: Epaisseur en 0m01	Fermes: Ecartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement
A. — Un système unique de contrefiches. *(2 par poteau)* [26] (f18).													
Ellipses	Ouroux				36m / 38	8m02 / 8.80	20c	1m80	0m3435 / 0.432	5k19 / 5.02	30f80 / 30.15		
	Big Muddy River	I	223	228	42.67	9.14	25	1.225				vle nord 38mm / vle sud 20	42mm / 33
	Garching (voûte articulée)	IV	93	98	44.35 / *38.55*	13.34 / *7.23*	18	1.235			48.20	80	39
Arcs assez surbaissés (Ponts suisses)	Guggersbach	III	15	60	50.20	8.22		1.58	0.35	7.3	37.50	40	amt 30 / aval 35
	Lichtensteig		89	162	42.82	11.54	22	1				80	40
	Krummenau		91	165	63.26	13.85	22	0.96	0.77	21.6	68.90	130	25
Arcs très surbaissés — Ponts allemands	Orléans	III	233	259	43.85	5.80	25	1.70	0.58	15.2	40.10		20 à 29
									Moyenne des 7 cintres, pieux compris				
	Mehring		231	252	46	6.17	20	1.18	0.62			100	70
	Trittenheim		235	277	46	6.17	20	1.17				100	
	Longuich		237	279	43	5.34	20	0.96	0.82	16		120	
Articulés	Göhren	IV	125	140	60 / *60.56*	6.75 / *6.80*	20	1.08 / 1.03 / 1	0.51			122	66
	Wallstrasse		125	148	65.45 / *57*	11.94 / *5.80*	25	1.40	0.58		42.20	90	12
	Hochberg		167	177	39.40 / *40*	5.40 / *5.40*	20	1.48	0.49	5.7	30.30	100	
	Cornelius		167	181	44 / *41*	*3.42*	24	2	0.71	5.5		120	45
	Reichenbach		169	183	44 / *41*	*4.10*	25	2	0.70	5.8		100	amt 48 / aval 47
	Maximilien		169	194	45.87 / *44*	*4.90*	24	2	0.72	5.7		120	
	Wittelsbach		171	199	44 / *41*	*4.10*	25	2	0.70	5.71		120	40
	Inzigkofen		221	226	47.90 / *43*	8.30 / *4.38*	16 / 18	1.07			18.70	153	amt 49 / aval 43
	Neckarhausen		221	233	59.40 / *50*	12.585 / *4.545*	18	1.30	0.35		21.90	200	amt 67 / aval 78
	Max-Joseph		223	244	64 / *60*	8 / *6*	24	2.10	0.55	2.4	44.60	120	45
B. — Deux systèmes de contrefiches. *(4 par poteau)* [27] (f19).													
Ellipses	Annibal	I	89	113	55	14.02	bois ronds de 21c	1.32	0.54	3.3	66.20		260
	Diable	I	89	117	55	13.55	bois ronds de 21 et 26c	1.30	0.58	4.5	57.50	130	65
Arc peu surbaissé	Céret	II	121	161	45	19.50	30	1.35	1.31	21.7	104.20	70	90

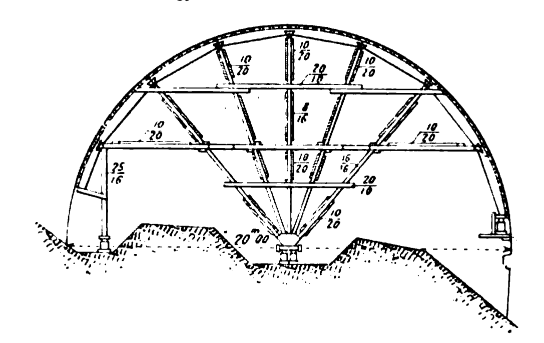
26. — Michelau, III, 195, 209; Schwusen, III, 195, 213; Neckargartach, IV, 169, 189; Grasdorf, IV, 125, 130; Gräveneck, IV, 211, 214; Sigmaringen, IV, 251, 255; Boberullersdorf, III, 287, 299; Cabin-John, III, 73, 76.

27. — Pont de Villefranche sur la Têt (1890, Ligne de Prades à Olette) : Portée, 39m346 ; montée, 17m.

§ 4. — *CINTRES FIXES A RAYONS* (R)

Art. 1. — Rayons seuls (R). — *A. — Type Saint-Waast (pleins cintres bas).* — On fait aboutir toutes les contrefiches à un seul support, comme des rayons de roues sur un moyeu (f_{20}, Φ_2).

f_{20} — Pont de Saint-Waast [28]



Φ_2 — Pont sur le Bachelard [29]



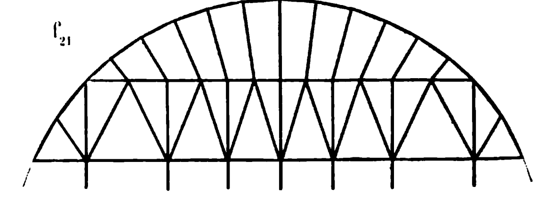
Intrados	Ponts :	Voir: Tome	Voir: page: Tableau synoptique	Voir: page: Monographie	Portée	Montée	Fermes: Epaisseur en 0m01	Fermes: Ecartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle: Cube de bois	Par m. q. de douelle: Poids de fer	Par m. q. de douelle: Dépense	A la clef en m/m: Surhaussement	A la clef en m/m: Tassement
Pleins cintres	Saint-Waast [28, 31]				20m	10m	14 / 16	1m50	0mc232	8k 27	19f 49		5mm
	Le Bachelard [29]				32	16	18	1.74	0. 346	15.35	33.04		
Arcs peu surbaissés	Luxembourg (voûtes latérales)				21.60	10.80	14 / 16	1.50	0. 30	14.39	44.29		
	Place Croizière [30]				30	10			0. 606	24.16	51.86		

B. — Type Lavaur

(Voûtes à grande flèche)

Plusieurs étages [32] (f_{21})

f_{21}



Intrados		Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Plein cintre		Brent	I	13	35	44	22	25	1.50	0. 77	9.6	67		
Arcs	peu surbaissés	Lavaur	II	119	137	61.50	27.50	20 / 25	1.50	0. 66	22.8	76.90	0mm	18.7
		Escot	II	123	175	56	18.70	25	1.50	0. 52	16.3	135.70	35	40
		Eaux-Salées [33]				50	25	20 / 25	1.50	0. 70	20.8	112.32	0	31
	assez surbaissés	Gour-Noir	III	81	104	62	16.10	25	1.56	0. 71	28.6	79.20	30	14
		Steyrling	III	87	139	70	15.70	30 × 42	1.50	1. 72		83.30	250	130

28. — Ligne de Montauban à Castres, 1882-1884 : voûtes de rive.

29. — Arche de 32m sur le Bachelard (Basses-Alpes), route nationale n° 210 (1901-1903); cintre étudié, en 1900, sur la demande de M. l'Ingénieur en chef Zürcher. Même cintre à une arche de 30 m de la même route (1905-1907).

30. — Près Ardes-sur-Couze (Puy-de-Dôme).

31. — Mêmes cintres aux arches de rive du pont d'Amélie-les-Bains, sur le Tech, 26m (Chemin de fer d'Elne à Arles-sur-Tech, 1890-1892).

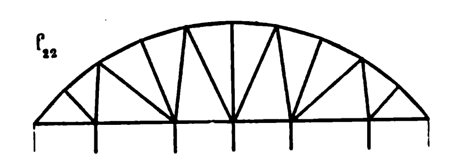
32. — Gutach (III, 124); Schwändeholzdobel (III, 127).

33. — Ligne de Miramas à l'Estaque. — Voir APPENDICE.

Art. 2. — Rayons et triangles (RT)

Type Antoinette [34]

Un étage (f_{22})

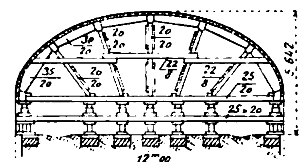


Intrados	Ponts :	Voir — Tome	Voir — page — Tableau synoptique	Voir — page — Monographie	Portée	Montée	Fermes — Épaisseur en 0m01	Fermes — Écartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle — Cube de bois	Par m. q. de douelle — Poids de fer	Par m. q. de douelle — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement
Ellipses 34-a	Amidonniers — Voûtes — centrale — amont	I	189	199	46m	10m99	Fermes intermédiaires : 24c	1m90	0m354	13k5	51f40	30mm	36mm
	Amidonniers — Voûtes — centrale — aval								0. 52	13.1	48.40	30	33
	Amidonniers — Voûtes — intermédiaire — amont				42	10.38			0. 49	13.6	47.10	25	28
	Amidonniers — Voûtes — intermédiaire — aval								0. 47	13.2	44.60	25	23
	Amidonniers — Voûtes — rive droite — amont				38.50	9.43	Fermes de rive : 20c		0. 46	13.7	44.70	20	19
	Amidonniers — Voûtes — rive droite — aval								0. 44	13.2	42.30	20	21
	les Calvets [35]				27	6.90	16 / 20	1.40	0. 40 / 0. 375	24.38	23.97		
	la Samponne [35,36]				27	6.90	16 / 20	1.40	0. 386	24.5			
	Belleperche [35]				33	8.20	16 / 20	1 40	0. 416	21.3	44.24		
Arcs — peu surbaissé 34-b	Antoinette	II	119	145	50	15.90	20 / 25	1.40	0. 59	24.8	102.50	0	13
Arcs — très surbaissé	Saint-Loup [37]				33	4.40	18 / 20	1.65	0. 45	23.5	45.76	30	40 à 50

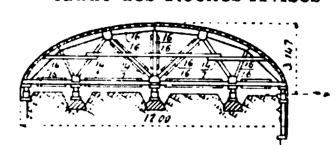
Art. 3. — Quelques autres applications du type à rayons seuls (Saint-Waast, Lavaur), et à rayons et triangles (Antoinette). — Le type à rayons est très souple et s'ajuste à toutes voûtes. Exemples :



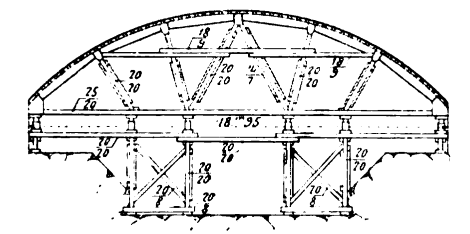
f_{23} — Passage supérieur de Corabeuf [38]



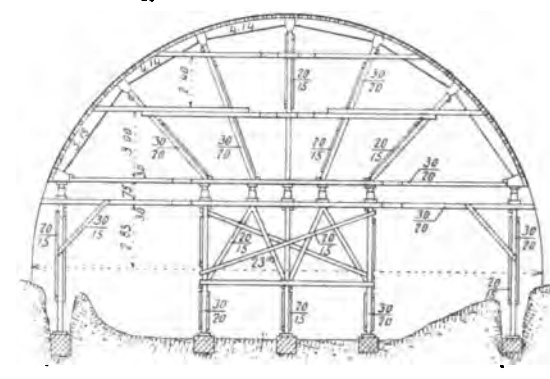
f_{24} — Viaduc des Roches-Avises [38]



f_{2} — Passage supérieur de Laveix [39-a]



f_{26} — Viaduc de Muratel [39-b]



34. — Type Antoinette. Ponts en arc assez surbaissé de : Pouch (III, 111), Freyssinet (III, 112).
34-*a*. — Pont Saint-Pierre (I, 120). 34-*b*. — Pont de Wäldlitobel (II, 157); Pont Victoria (II, 205).

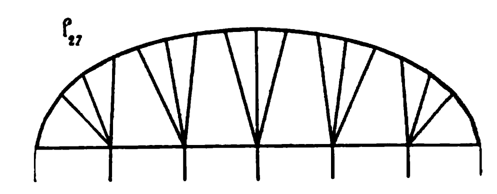
35. — Ligne de Castelsarrasin à Beaumont. 36. — On y a employé les cintres du viaduc des Calvets,

37. — Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat. 38. — Ligne d'Epinac à Dijon. (Voir Tome III, p. 333, renvoi 24.)

39. — Ligne de Nontron à Sarlat. Section d'Hautefort à Terrasson et de Condat à Sarlat. *Rapport sur l'exécution des Travaux :*
a) Passage supérieur de Laveix, p. 61, Pl. 25 ; *b*) Viaduc de Muratel, p. 37, Pl. 37.

Art. 4. — Rayons et contrefiches isolées (RC)[40] (f_{27})

(Type Gloucester)

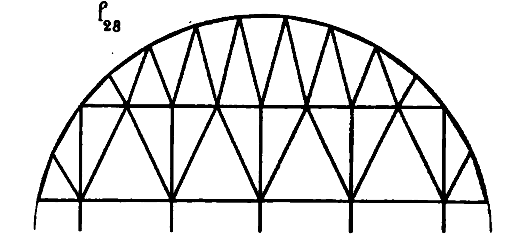


Intrados	Ponts :	Voir — Tome	Voir — page — Tableau synoptique	Voir — page — Monographie	Portée (*Portée entre articulations*)	Montée (*Montée entre articulations*)	Fermes — Epaisseur en $0^{m}01$	Fermes — Ecartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle — Cube de bois	Par m. q. de douelle — Poids de fer	Par m. q. de douelle — Dépense	A la clef en m/m — Surhaussement	A la clef en m/m — Tassement
Arcs très surbaissés, articulés	Höfen	IV	39	41	41^{m} / *28*	*$2^{m}80$*	25^{c}	$1^{m}35$			$56^{f}40$		2^{mm}
	Marbach		39	45	43.50 / *32*	*3.10*	25				17.30		72
	Baiersbronn		39	48	40 / *33*	*3.30*					16.20		
	Munderkingen		53	56	59 / *50*	*15*	24	1.85			22.60	120^{mm}	

Les contrefiches ne s'entr'aident pas. Ce type est fort inférieur au précédent à rayons et triangles.

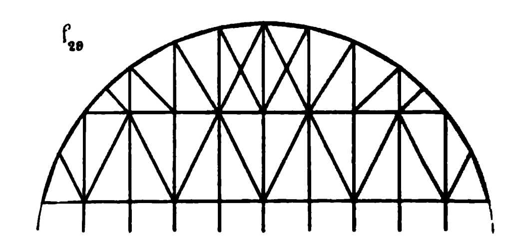
§ 5. — *CINTRES A TREILLIS. PLUSIEURS ÉTAGES. — ARCS A GRANDE FLÈCHE*

Art. 1. — Treillis en W[41] (f_{28})



Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs peu surbaissés	Palmgraben	II	121	165	49	14.44	Etages: sup^r : 21, infér^r bois ronds: 24 à 27	1.50			35	130	
	Schalchgraben			170	52	15.033	Etages: sup^r : 17 à 22, infér^r bois ronds: 18 à 27	1.50			80.80	150	110
Arcs assez surbaissés	Krenngraben	III	87	136	40	10	Etages: sup^r : 20, infér^r bois ronds: 20 à 25	1.60			49.50	100	
	Salcano		87	144	85	21.80	Etages: sup^r : 20 à 28, inter^m: 20 à 25, infér^r : 21 à 32	1.30	1.51	12.5	359.90	220	40
	Langenbrand		89	153	59	14.75	Etages: sup^r : 25, infér^r: 40	1.50	0.74	13.9	48.80	150	52

Art. 2. — Treillis en N (f_{29})



Intrados	Ponts	Tome	Tableau synoptique	Monographie	Portée	Montée	Epaisseur	Ecartement	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Arcs assez surbaissés	Montanges	III	17	65	80.29	20.465	25	1.633	1.07	80.5	186.30	160	am^t: 85, av^t : 160
	Strandeelven		85	132	41	11.25		1.25 / 1.15			49.10		42

40. — Gloucester, I, 108 ; Teinach, III, 204 ; 41. — Jaremcze, III, 116 ; Rothweinbach, II, 172

Intrados		Ponts :	Voir : Tome	pages : Tableau synoptique	pages : Monographie	Portée	Montée	Fermes : Epaisseur en 0m01	Fermes : Ecartement d'axe en axe	Par m. q. de douelle : Cube de bois	Par m. q. de douelle : Poids de fer	Par m. q. de douelle : Dépense	A la clef en m/m : Surhaussement	A la clef en m/m : Tassement
Ellipse		Avenue Edmonson	I	91	124	42m37	13m39	20c 3	1m676	0mc64			16mm	8mm
Arcs	assez surbaissés	Chester	III	11	29	60.96	12.80			0.38		16f 90		
		Oppedette[43]				32	6.40	22 25	1.65	0.43	9k 91	27		
	très surbaissé (articulé)	Elise	IV	127	152	47.50 43.50 entre rotules	4.40		1.16	0.62			80	40

§ 7. — *COMMENT ON A APPUYÉ LES CINTRES FIXES QUAND ON NE POUVAIT PAS BATTRE DE PIEUX*

On a :

nivelé le rocher et fixé ensuite les poteaux par des goujons[44];

foré des trous dans du rocher[45], dans de la marne dure qui se serait étoilée sous le battage[46], puis descendu dans ces trous les pieux coupés normalement à leur axe, en les y maintenant par du ciment coulé ou injecté;

appuyé les poteaux sur des semelles en bois[47], sur des plates-formes en maçonnerie[48], en béton[49].

§ 8. — *CUBE DE BOIS* K, *POIDS DE FER* p, *DÉPENSE* d, *PAR* m. q. *DE DOUELLE POUR LES DIVERS TYPES DE CINTRES FIXES*

Art. 1. — Graphique des renseignements recueillis (p. 143). — Il rapproche et compare pour 62 cintres fixes les quantités de bois et de fer, et aussi les prix, — le tout par m. q. de douelle, celle-ci calculée comme l'indique l'Avertissement en tête des Tomes I à IV.

Les portées sont comptées au-dessus du sol[50].

Au graphique, ne figurent pas les cintres qui cubent plus de 1mc par m. q. de douelle[51].

42. — Nydeck (II, 33); Chemnitz (IV, 109) : appuis sur palées.

43. — Basses-Alpes (1904).

44. — Bellows Falls (III, 227).

45. — Gour-Noir (III, 105); Rébuzo (I, 48) : quelques palées.

46. — Lavaur (II, 137); Antoinette (II, 146); Amidonniers (I, 199).

47. — Signac (I, 132).

48. — Plauen (III, 54).

49. — Rébuzo (I, 50); Cornélius (IV, 181).

50. — On a réduit celle des ponts : Antoinette, à 47m50; du Diable, à 54m; de Lavaur, à 60m; de Saint-Waast (étude*), à 63m.

* Projet d'une voûte de 65m, présenté en 1882, non approuvé.

51. — Notamment, parmi ceux de 40m et plus, ceux de : Wäldlitobel, 1mc03 (II, 121); Calcio, 1mc08 (III, 81); Walnut Lane, 1mc20 (II, 63); Plauen, 1mc24 (III, 15); Nogent, 1mc373 (I, 77); Salcano, 1mc51 (III, 87); Steyrling, 1mc72 (III, 87).

Art. 2. — Que conclure du graphique ? — Pour quelques cintres, on a pris les équarrissages un peu au hasard.

Dans le coût des cintres fixes, le fer compte peu.

Pour les cintres à rayons (seuls R, ou à triangles RT), tant que la hauteur entre la clef et le terrain naturel est inférieure à la moitié de la portée, on peut accepter :

$$K = 0,06 + \frac{2a}{100}$$

Le cube total, par conséquent le prix, varie donc avec le carré de la portée.

K est aussi fonction de la hauteur h entre la clef et le sol, de la forme de la voûte, et quelque peu encore de sa largeur. Il augmente avec la hauteur et le surbaissement.

Les cintres à rayons sont légers.

Pour des portées voisines, les cintres de Neckarhausen, Göhren, Max-Joseph et Wallstrasse semblent sensiblement plus légers que celui de Lavaur : mais ils sont beaucoup plus bas.

CHAPITRE III

CINTRES COMPLÈTEMENT RETROUSSÉS

C'EST A-DIRE NE S'APPUYANT QU'AUX NAISSANCES OU TOUT PRÈS DES NAISSANCES

§ 1. — *QUAND ET POUR QUELLES VOUTES*[52] « *RETROUSSE-T-ON* » *LE CINTRE ?*

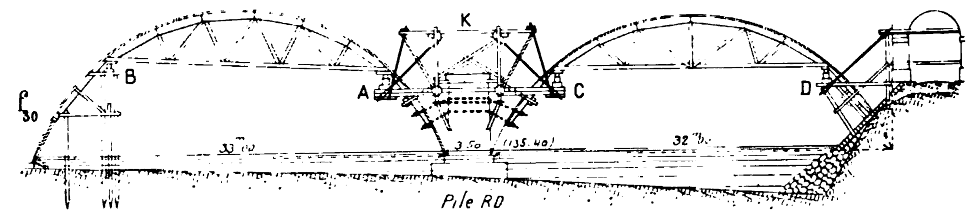
On « retrousse » une ferme quand on ne peut pas l'appuyer sur le sol, c'est-à-dire quand il est trop loin ; — qu'il est mauvais ; — quand on n'y peut pas enfoncer de pieux ; — quand il ne faut pas gêner sous le cintre l'eau, les crues, la navigation ; — pour deux voûtes jumelles, quand on veut transporter tout d'une pièce le cintre de la première voûte sous la deuxième[53].

52. — Au XVIIIe siècle, on employait systématiquement pour les anses de panier surbaissées des cintres retroussés flexibles, formés de plusieurs cours d'arbalétriers assemblés sous des angles très ouverts, reliés par des moises pendantes (Ponts d'Orléans, 1751-1760, plus grande arche : 32^{m}48 ; de Nogent-sur-Seine, 1769, 29^{m}24 ; de Mantes, 1757-65, 38^{m}98 ; de Neuilly, 1768-74, 39^m). On acceptait des tassements énormes : 0^{m}51 à Neuilly.

On voulait que les cintres suivissent, sans jarrets, tous les mouvements de la voûte : on employait des mortiers de chaux grasse qui prenaient très lentement et restaient très longtemps plastiques. On a encore, sur de tels cintres, construit les ponts de Vieille-Brioude (I, 25), de Prarolo et Maretta (III, 96), de Saint-Etienne (II, 56).

Toutefois, dès la fin du XVIIIe siècle, Gauthey recommandait de soutenir autant que possible les cintres sur leur longueur par des appuis portant directement sur le ferme. Il a construit sur cintres fixes le pont de Navilly, sur le Doubs, achevé en 1790.

53. — Au pont de Romans, sur l'Isère (voir tableau, p. 70), les fermes retroussées AB, CD (f_{30}) des



deux voûtes rive droite, étaient posées en A et C sur les abouts d'un cantilever K installé sur la pile rive droite.

CINTRES FIXES. — Cube de bois K, poids de fer *p*, par mètre carré de douelle

Les Cintres à	sont écrits en	et indiqués par le signe
Rayons *(éventail)*	*Italiques*	○
Poteaux et triangles	**lettres droites**	□
Poteaux et contrefiches	*lettres rondes*	◇

On a souligné ceux que l'on sait avoir été calculés.
h est la hauteur au-dessus du terrain naturel.
(E) indique les cintres à rayons, étudiés, non exécutés.

Echelles. — Portée 0m005 p. 1m ; K cube de bois, 0m15 p. 1mc ; *p* poids de fer, 0m0007 p. 1kg ; Epaisseur du 1er rouleau, 0m01 p. 1m.
Les échelles sont prises de telle sorte qu'au point de vue de la dépense, le bois et le fer soient équivalents ; c'est-à-dire que le m. c. de bois étant estimé 75f, le kilog. de fer 0f35, la distance verticale entre les deux points relatifs à un ouvrage donne le prix par m. q. de douelle à l'échelle de 0m002 p. 1f.

K, Cube de bois par m.q. de douelle

Cintres à rayons

$K = 0{,}06 + \frac{2a}{100}$

Epaisseur uniforme du 1er rouleau

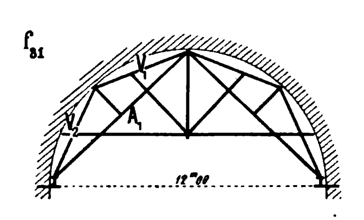
admise dans le calcul des cintres à rayons

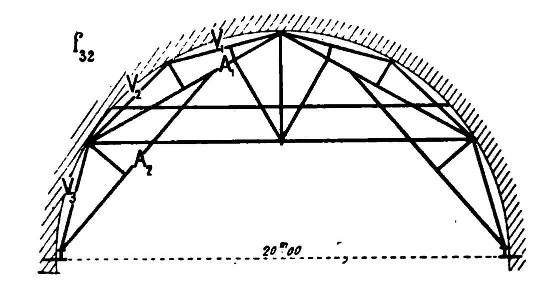
Portée 2a

P, Poids de fer par m.q. de douelle

Art. 1. — Viaducs en plein cintre. Voûtes jusqu'à 30m.

De 4 à 16m, 2 vaux V_1, V_2, un arbalétrier A_1 (f_{31}).





De 16 à 25m, 3 vaux V_1, V_2, V_3, 2 arbalétriers A_1, A_2 (f_{32}).

C'est le type classique des cintres de viaducs, justifié jusqu'à 25m par d'innombrables exemples. Il n'a guère changé depuis les premiers viaducs de Morandière.

Voici, pour quelques cintres à arbalétriers, des quantités et des prix :

Viaducs :	Portée	Fermes		Par m. q. de douelle			Lignes de :	Dates
		Epaisseur en 0m01	Ecartement d'axe en axe	Cube de bois	Poids de fer	Dépense		
du Crêt et de la Culée	5m	12c	1m28	0mc 244	3k 671	16f 64	Morez à Saint-Claude	1909-11
du Puits	6	12	1.28	0. 236	3.083	15.64		
de la Croix	8	20		0. 264	4.27	26.94	Brives à Limoges	1873-75
de Valfin	10	20	1.32	0. 289	3.164	21.81	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Châteaulin	12	28		0. 343	3.74	23.86	Nantes à Châteaulin	1863-64
de Parthenay	12	28		0. 325	2.24	13.54	Neuville à Bressuire	1879-81
du Saillard (calculé)	12	20	1.40	0. 240	2.077	17.54	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Quimperlé	15			0. 345	3.73		Nantes à Châteaulin	1861-63
de Vezouillac	16		1.60	0. 289			Rodez à Millau	1873-77
de Sénouard	18	25	1.60	0 348	10.55	32.10	Marvejols à Neussargues	1879-82
d'Aguessac	18.46	30	1.55	0. 304			Rodez à Millau	1873-77
du Sarget	20	27		0. 460	7.10		Brives à Limoges	1873-75
du Piou	20	25	1.60	0. 362	13.80		Séverac à Marvejols	1878
de Chante-Perdrix	20	25	1.60	0. 336	13.87	34.62	Marvejols à Neussargues	1879-82
de Barajol	20	25	1.45	0. 463	42.71	52.80	Bort à Neussargues	1903-07
de Morez	20	25	1.47	0. 443	2.33	27.11	Morez à Saint-Claude	1909-11
de Pompadour	25	27		0. 534	5.81		Brives à Limoges	1873-75
de la Crueize	25	21	1.55	0. 434	12.88	42.48	Marvejols à Neussargues	1879-82
de Mussy	25	27	1.47	0. 436			Paray-le-Monial à Givors	1892-97
des Plaines	30	27	1.333	0. 692	51.052		Moûtiers à Bourg-Saint-Maurice	1910-12

A titre de comparaison avec les cintres à arbalétriers de 25m, voici celui du Saillard, à arbalétriers rayonnant des naissances [54], cintre *calculé*.

du Saillard	25	18 / 22	1.55	0. 351	16.194	31 34	Morez à Saint-Claude	1909-11

54. — Imité de celui de Ramounails (II, 179, 187).



Art. 2. — Voûtes de 40m et plus.

Intrados	Ponts :	Voir :			Portée	Montée	Fermes		Par m. q. de douelle			A la clef en m/m	
		Tome	pages : Tableau synoptique	pages : Monographie			Epaisseur en 0m01	Ecartement d'axe en axe	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Pleins cintres	Collonges	I	11	32	40m	20m	30c	1m34	0mc99	19k 7	122f 70		
Pleins cintres	Oloron	I	30	46	40	20	35	1.17 / 1.84	1. 08	9.4	95.40		30mm
Pleins cintres	Saint-Sauveur [55]	I	11	29	42	21	30	1.57	2.23 / 1.23	25.5 / 13.8	313.40 avec l'échafaudage / 155.60 cintre seul		
Arcs peu surbaissés	Ramounails	II	179	187	40.30	12.90	18 / 22	1.35	0.47	22.7	45.60	30mm	21
Arcs peu surbaissés	Gravona	II	179	184	43.53	16.80	23	1.10	1.13	3.6	69.30		
Arcs assez surbaissé	Seythenex (voûte rive droite)	III	171	179	41.19	10.05	27	1.25	0.63	11.1	63.50	50	29

Le cintre de Ramounails, avec ses arbalétriers rayonnant des naissances et ses entraits horizontaux, est fort bien compris.

Mais, aux autres grandes voûtes, le type à arbalétriers n'a pas été heureusement appliqué : à Oloron, à la Gravona, il est confus ; à Collonges, les arbalétriers atteignent 21m20 avec 30c × 30c.

§ 3. — *CINTRES A ÉTAGES EN PORTE-A-FAUX*

Comme ils sont fort épais aux naissances, ils exagèrent la portée de la voûte : celle-ci devrait peu dépasser la portée retroussée du cintre, qui est celle qu'imposent les lieux : or, elle est bien plus grande (tableau ci-dessous).

Ces cintres sont un peu confus : il y a beaucoup de pièces, et il n'est pas aisé d'en prévoir le travail [56, 57].

Voici ce qui concerne 4 grands cintres :

Intrados	Ponts :	Voir :			Portée 2a	Montée	Portée retroussée du cintre 2a'	Augmentation de portée de la voûte 2a-2a'	Fermes		Par m. q. de douelle			A la clef en m/m	
		Tome	pages : Tableau synoptique	pages : Monographie					Epaisseur en 0m01	Ecartement d'axe en axe	Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
Plein cintre	Solis	I	53	57	42m	21m	27m	15m	22c à 30c	1m15	0mc85	8k 5	66f 10	100mm	51mm
Ellipse surhaussée	Wiesen	I	233	241	55	33.34	39	16	22 à 28	1.33	2.65	51.9	119.50	100	100
Arcs peu surbaissés	Cinuskel	II	179	190	46.98	20.241	36	10.98	18 à 20	1.20	0.53	14.8	52.20	0	62
Arcs peu surbaissés	Tuoi	II	181	195	47.71	21.42			18 à 20	1.00 / 0.95	0.61	7.6	61.10	100	33

55. — Il a fallu soutenir le cintre par un échafaudage partant du fond de la vallée.

f_{33} — Pont sur le Val-Mela
Cintre — État des travaux au moment de la chute

56. — Chute du cintre du pont sur le Val-Mela (Ligne de Bevers à Schuls, Engadine) (f_{33}), 29 août 1911.

Il était calculé pour le 1er rouleau.

Il y avait des bois ronds mal assemblés. L'été de 1911 a été très chaud : les bois avaient travaillé.

A l'amont, le bandeau débordait la ferme de 30 à 35mm.

Le 29 août 1911, — jour de la chute, — les points O et p avaient tassé par rapport aux points m de :

	Amont	Aval
O	20mm	5mm5
p	55mm	28mm

Schweizerische Bauzeitung, 23 novembre 1912, p. 281 à 285 : « *Zum Gerüsteinsturz des Val-Mela-Viadukts auf der Linie Bevers-Schuls der Rh. B.* »

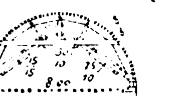
57. — Même type de cintre : au plein cintre de Muttnertobel (cintre retroussé sur 16m50) (Albula-Bahn, Denkschrift im Auftrage der Rhätischen Bahn, — Prof. Dr Hennings, Pl. 13, Coire, chez F. Schuler, 1908) ; — à l'arche de Triquent sur le Triège (Portée, 35m40 ; montée, 9m70), (Ligne électrique à voie de 1m du Châtelard à Martigny ; — au plein cintre de 25m de Stulsertobel (Ligne de Bevers à Schuls, Engadine).

§ 4. — *CINTRES RETROUSSÉS A RAYONS (ÉVENTAIL)*

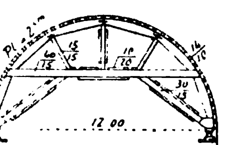
Art. 1. — Entrait non armé. — Pleins cintres de 8^{m} à 12^{m}. — L'éventail repose sur un chevalement fait d'un entrait et de deux arbalétriers (f_{34}, f_{35}, f_{36}).

L'entrait est fléchi dans f_{34}, f_{35}, non dans f_{36}.

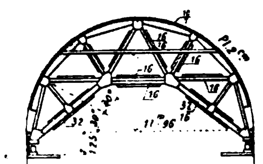
f_{34} – Viaduc du Caty [58]



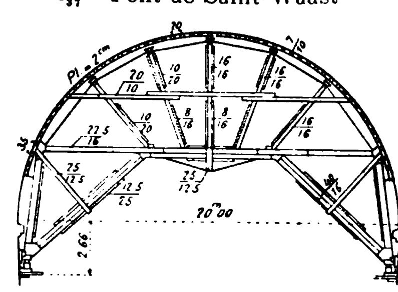
f_{35} – Viaduc de Nice [58, 59]



f_{36} – Viaduc de la Bassera [60]



f_{37} – Pont de Saint-Waast [58]

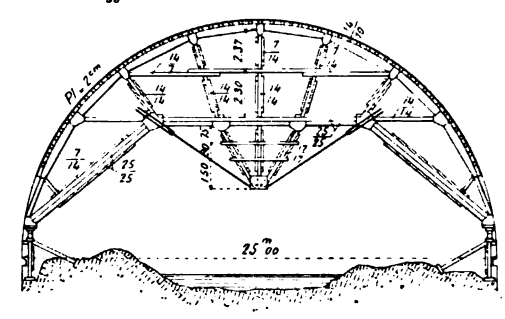


Art. 2. — Entrait armé par un tirant *(Type Saint-Waast)*. Pleins cintres de 20 à 25^{m}. — Pour 20 à 25^{m}, on a armé l'entrait par un tirant en fer rond fileté aux deux bouts (f_{37}) [61, 62].

Art. 3. — Entrait armé par un câble d'acier. Cintres de l'Arconce, 25^{m} (f_{38}), du Sornin, 35^{m} (f_{39}). — Pour armer l'entrait, un câble d'acier vaut mieux qu'un tirant. Il résiste mieux à la tension et se règle comme on veut.

f_{39} – Pont du Sornin [65]

f_{38} – Pont sur l'Arconce [63, 64]



Quand la portée augmente, on brise les arbalétriers [66] qui portent l'entrait,

58. — Ligne de Montauban à Castres (1882-1884).

59. — Le type de Nice a été appliqué à des viaducs de la ligne de Nontron à Sarlat (1885-87) : Saint-Jean-de-Cole (14^{m}), Saint-Germain (15^{m}).

60. — Ligne de Nice à Coni (1913).

61. — Le type de Saint-Waast a été appliqué à trois ponts en plein cintre de la ligne d'Elne à Arles-sur-Tech : sur la rivière Ample (13^{m}); sur la Palmère (21^{m}); sur le Tech, à Amélie-les-Bains (26^{m}).

62. — On a, de même, raidi par un tirant l'entrait des cintres partiellement retroussés de deux ponts sur l'Aude, de 30^{m} (Ligne de Quillan à Rivesaltes, 1899) : ponts d'Aliès et d'Axat.

63. — Ligne de Paray-le-Monial à La Clayette (1896-1900).

64. — Même cintre au pont de Courlans, sur la Vallière (25^{m}) (Ligne de Saint-Jean-de-Losne à Lons-le-Saunier, 1900-1902).

65. — Ligne de La Clayette à Lamure (1896-1900).

66. — Au pont du Castelet (II, p. 132), retroussé sur $26^{m}40$, l'écartement était maintenu par des cornières attachées à un encoffrement de tôle qui coiffait l'about des arbalétriers : on ne pouvait pas régler la tension.

suivant un polygone dont chaque sommet est tenu par un câble : on n'y accepte pas d'angle de plus de 160°.

On a fait ainsi : d'abord le cintre de 35m du Sornin (f_{39}, Φ_3), puis ceux de Luxembourg [67] et de Constantine [68].

Φ_3 - Cintre du Pont du Sornin



Voici ce qu'ont coûté les cintres de l'Arconce et du Sornin :

	Pont sur l'Arconce		Pont du Sornin	
I. Main-d'œuvre :				
Fondations		113f 70		86f 35
Bois — Épure, taille, montage	1.604f 20		4.709f 20	
Bois — Démontage et enlèvement	490 50	2.201 30	1.246 60	6.313 65
Bois — Outils et faux-frais (environ 1/20)	106 60		357 85	
Ensemble		2.315 »		6.400 »
II. Fournitures (les matériaux restant à l'Entrepreneur) :				
Bois sur chantier (déchets non compris)	1.904 16		7.236 60	
Métaux — Tôles pour assemblages	488 76		1.413 60	
Métaux — Fers pour boulons, brides, broches, clameaux, chevilles	441 78	3.813 56	786 20	11.752 90
Métaux — Acier pour câbles, tendeurs, étriers, plaques d'ancrage, et fonte pour culots	910 20		2.171 75	
Métaux — Plomb pour articulations, zinc aux abouts des pièces	68 66		144 75	
III. Divers :				
Câbles de contreventement, pieux d'amarrage, boîtes à sable		46 »		1.047 10
Total		6.174 56		19.200 »

67. — II, p. 72 bis. 68. — II, p. 110.

Art. 4. — Cintres retroussés à rayons (Éventail) : Dimensions, quantités, prix.

	Viaducs en plein cintre				Ponts en plein cintre			Ponts en arc peu surbaissé		
	Caty	Nice	Bassera	St-Waast	Courlans	Arconce	Sornin	Castelet	Constantine	Luxembourg
Voir Tome, page	V, 146	V, 146	V, 146	V, 146		V, 146	V, 146	II, 117, 132	II, 65, 110	II, 61, 72bis
Portée	**8m**	**12m**	**12m**	**20m**	**25m**	**25m**	**35m**	**41m20**	**68m76**	**84m65**
Montée	4m	6m	6m	10m	12m50	12m50	17m50	14m	25m	31m
Fermes — Nombre	4	4	4	4	6	6	6	5	4 sous chaque anneau	5
Fermes — Epaisseur de rive — chevalement		0m12		0m14		0m25	0m25	0m25	0m38	0m25
Fermes — Epaisseur de rive — cerveau	0m10		0m16			0.14	0.18	0.20	0.23	0.19
Fermes — Epaisseur intermédiaire — chevalement	0.15	0.15		0.16		0.25	0.30	0.25	0.38	0.38
Fermes — Epaisseur intermédiaire — cerveau	0.10					0.17	0.23	0.25	0.23	0.23
Fermes — Ecartement d'axe en axe — de rive		1.37		1.50		1.50	1.60	1.65	1.50	1.60
Fermes — Ecartement d'axe en axe — intermédiaire							1.50	1.50		
Cube de bois (poteaux compris) — d'une ferme — de rive	0mc96	2mc23	2mc647	5mc73	7mc10	7mc082	21mc625	29mc379	45mc716	42mc374
Cube de bois — d'une ferme — intermédiaire		2.59		6.41	8.20	7.864	25.91	34.391		55.775
Cube de bois — de toutes les fermes C_1	3.84	9.64	10.588	24.28	47	45.62	146.89	161.931	365.724	252.073
Cube de bois — des pièces communes (platelage, contreventements, couchis) C_2	3.49	6.37	5.999	12.09	31.77	22.33	47.27	45.308	111.477	134.466
Cube de bois — total du cintre $C=C_1+C_2$	7.33	16.01	16.587	36.37	78 77	67.95	194.16	207.239	508.907	386.539
Cube de bois — **par m.q. de douelle** $K=\frac{C}{S}$	**0.14**	**0.204**	**0.223**	**0.281**	**0.248**	**0.257**	**0.511** [70]	**0.556**	**0.597**	**0.684**
Cube de bois — rapport $\frac{C_2}{C}$	0.48	0.40	0.36	0.33	0.40	0.33	0.24	0.22	0.22	0.34
Poids de fer — total P	179k	276k	1.400k	1.965k	7.879k	9.443k [69]	15.520k	14.759k	83.719k	57.900k
Poids de fer — **par m.q. de douelle** $p=\frac{P}{S}$	**3.5**	**3.51**	**18.8**	**15.19**	**24 77**	**35.68**	**40.81**	**39 60**	**99**	**95**
Poids de fer — par m.c. de bois $\frac{P}{C}$	24.42	17.24	84.4	54.83	100	139	79.94	71.21	163.80	149 79
Dépense réelle (tout compris) — totale D			2.943f 38	3.293f »	5.820f 75	6.174f 56	19.200f	30.000f	250.132f 84	101.138f 75
Dépense réelle — par m.q. de douelle $\frac{D}{S}$			39.72	25.46	18.30	23.29	50.48	80.50	296 »	165.80
Dépense réelle — par m.c. de bois $\frac{D}{C}$			177.45	90.64	73.90	90.87	98.89	144.76	489.50	261.65
Dépense par m.c. de bois, fers non compris			109.93		44.56	62.77	75.63	102.82	376.83	140.11

Constantine : Pour les deux anneaux.
Luxembourg : Pr un seul anneau. On a fait les 2 voûtes sur le même cintre.

§ 5. — *CUBE DE BOIS* K, *POIDS DE FER* p, *DÉPENSE* d, *PAR* m. q. *DE DOUELLE POUR LES DIVERS TYPES DE CINTRES RETROUSSÉS*

Art. 1. — Graphique des renseignements recueillis (p. 149). — Le graphique, p. 149, rapproche et compare pour 43 cintres retroussés les quantités de bois et de fer, et aussi le prix, — le tout par m. q. de douelle, celle-ci calculée comme l'indique l'Avertissement en tête des Tomes I à IV.

Au graphique, ne figurent pas les cintres qui cubent plus de 0mc80 par m. q. de douelle [71].

Art. 2. — Que conclure du graphique ? — Pour quelques cintres, on a pris les équarrissages au hasard.

Les cintres à rayons (seuls R, ou à triangles RT) sont légers; toutefois, sauf pour les très grandes portées, d'autres cintres quand ils sont *calculés,* peuvent l'être aussi.

Pour les cintres retroussés à rayons, on peut accepter, pour une première indication, les formules empiriques :

$$K = 0{,}04 + 0{,}012\ (2a) \qquad p = 1{,}2\ (2a) - 8$$

Sauf pour des hauteurs excessives, le cintre fixe est toujours plus économique. Mais si, pour le cintre retroussé, le prix de revient se peut assez approximativement évaluer d'après les quantités de bois et de fer, pour le cintre fixe, il y faut faire entrer les dépenses de fondation, de battage de pieux, etc...

69. — A l'Arconce, on a réemployé les câbles du Sornin, trop forts pour une voûte de 25m.

70. — Au Sornin, premier cintre à câbles, on a été timide.

71. — Notamment, parmi ceux de 40m et plus, ceux de : Solis, 0mc85 (I, 53); Collonges, 0mc99 (I, 11); Oloron, 1mc08 (I, 39); Gravona, 1mc13 (II, 179); Saint-Sauveur, 1mc23 (I, 11); Wiesen, 2mc65 (I, 233).

CINTRES RETROUSSÉS. — Cube de bois K, poids de fer p, par m. q. de douelle

Échelles

Portée : 0m003 p. m.
K, Cube de bois : 0m15 p. 1mc.
p, Poids de fer : 0m0007 p. 1kg.
Epaisseur du 1er rouleau : 0m01 p. 1m.

Les échelles sont prises de telle sorte qu'au point de vue de la dépense, le bois et le fer soient équivalents ; c'est-à-dire que le mc. de bois étant estimé 75f, le kg. de fer 0f35, la distance verticale entre les deux points relatifs à un ouvrage donne le prix à l'échelle de 0m002 p. 1f.

K, cube de bois par m.q. de douelle

$K = 0.04 + 0.012 \times 2a$

Portée 2a

Epaisseur uniforme du 1er rouleau admise dans les calculs des cintres

p, poids de fer par m.q. de douelle

$p = 1.2 \times 2a - 8$

Les Cintres à	sont écrits en	et indiqués par le signe
Rayons (*éventail*)	*Italiques*	o
Arbalétriers	**lettres droites**	□
Encorbellement	*lettres rondes*	◇

On a souligné ceux que l'on sait avoir été calculés.
(E) indique les cintres à rayons, étudiés, non exécutés.

SUPÉRIORITÉ DES CINTRES A RAYONS (ÉVENTAIL)
ET COMME CINTRES FIXES ET COMME CINTRES RETROUSSÉS

Dans ces cintres, les assemblages sont simples : au Sornin (f_{10}, Φ_1), à Luxembourg [71 bis], pas de tenons, de mortaises, d'embrèvements : par exemple, les vaux portent, sans coupe, sur les contrefiches ; tout tient par les couvre-joints boulonnés.

L'exécution en est facile et précise.

Ils n'ont pas de lignes surabondantes ; les calculs en sont très simples par la Statique graphique.

Ils doivent donc être les plus économiques : ils le sont.

Ils tassent peu.

Quand on construit une voûte, il faut connaître les points du cintre au droit desquels elle tendra à s'ouvrir. Dans un cintre susceptible de déformations d'ensemble, on ne le peut pas : avec le type en éventail, ce sont sûrement les abouts des contrefiches ; c'est là que, par un joint sec, un taquet, un coffrage, on ménagera une articulation dans le rouleau en construction.

J'ai employé ce type : en cintres fixes, pour pleins cintres, pour arcs peu surbaissés, assez surbaissés, très surbaissés, pour ellipses ; en cintres retroussés, pour toutes portées.

Les Ingénieurs qui l'ont appliqué s'en sont félicités.

Il est fort à conseiller.

CHAPITRE V

CINTRES MARINIERS
RETROUSSÉS SUR LA LARGEUR DE LA PASSE NAVIGABLE

Au-dessus d'une passe navigable, on a jeté :

des arbalétriers peu inclinés concourants [72], ou soutenant une pièce horizontale [73] ;

des fermes à grands arbalétriers très inclinés qui reçoivent la charge de flanc [74] (Φ_4) ;

des poutres de bois : à grandes mailles [75] ; à treillis serré [76] ;

des poutres : bois, et tirants en fer [77] ;

des poutres métalliques [78].

Φ_4 — Pont de Marmande : Cintres mariniers



71 bis. — II, p. 71 ter. 72. — Mehring (III, 231, 252), passe de 11m20.

73. — Lusserat (III, 89, 156), passe de 10m ; Orléans (III, 233, 259), passe de 9m ; Boucicaut (III, 231, 247), passe de 10m60 ; Neckargartach (IV, 169, 189), passe de 9m.

Au pont Boucicaut, on a agrandi la passe pendant la construction d'une voûte (III, 247).

74. — Marmande, 1881-1886 : arches de 36m, passe de 18m.

75. — Londres (I, 139, 147), passe de 13m50.

76. — Alma (I, 139, 155), passe de 11m80 ; Mantes (I, 141, 161), passe de 16m ; Pont-sur-Yonne (I, 211, 214), passe de 15m.

Viaduc du Point-du-Jour, 1863-66. (Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, série 3, section A, p. 20, Pl. 8) : à 2 arches, passe de 12m.

77. — Ponts de : Lays, sur le Doubs (26m) ; Arciat, sur la Saône (31m) ; Schweich (III, 235, 268), passe de 16m ; Cassel (III, 286, 303), passe de 6m.

78. — Longuich (III, 237, 279), passe de 19m.

CINTRES EN MÉTAL

Art. 1. — Pourquoi a-t-on fait des cintres en métal ? — Pour laisser passer les crues, la navigation [80, 81, 82], des trains [83].

Ils sont indiqués quand on a à construire un grand nombre de voûtes semblables [84], ou quand on doit faire un pont large en accolant des anneaux minces [79, 85].

Art. 2. — Types de cintres en métal. — On a fait en métal un étage inférieur seul [86], — la couronne des vaux seule, et alors à poutre pleine [87], — tout le cintre [88].

On en a appuyé [89] entre naissances.

On en a retroussé sur toute la portée [88].

Parmi ceux-ci, les uns sont posés à leurs abouts, d'autres articulés [90]. Il y en a d'articulés à la clef et aux retombées [91].

79. — Nouveau pont de Bâle sur le Rhin (1904-1905), 6 voûtes en maçonnerie : 2 de $24^{m}50$, 2 de 27^{m}, 2 de 28^{m}. Elles ont $18^{m}8$ de largeur : on les a faites chacune en trois anneaux de $6^{m}26$ sur un seul cintre à 4 fermes métalliques (f_{40}).

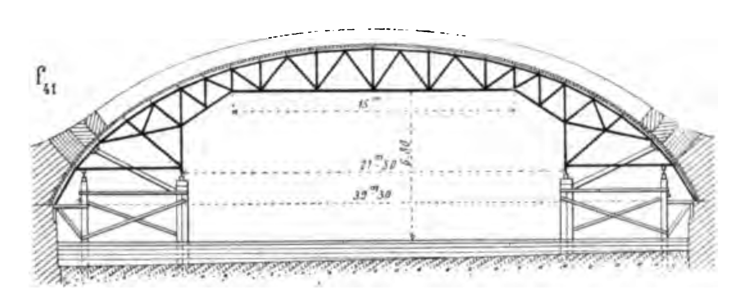
f_{40}

Chaque cintre a servi 3 fois pour une voûte, 6 fois pour les deux voûtes de même portée.

Tassement pendant la construction : 14^{mm} à 22^{mm}.

Die Haupt-, Neben-, und Hilfsgerüste im Brückenbau, — von Dr techn. Robert Schönhöfer, K. K. Ober-Ingenieur und Privatdozent, — W. Ernst und Sohn, Berlin, 1911, p. 95.

80. — Nouveau pont Auguste à Dresde. Voûtes en béton ; ouvertures : $32^{m}95$ à $39^{m}3$; largeur : 18^{m}.



f_{41}

Aux 5 plus grandes, on ménagea une passe marinière haute de $6^{m}80$ au-dessus de l'étiage, large de : $21^{m}50$ en bas, 15^{m} en haut.

Les cintres (f_{41}) avaient 10 fermes espacées de $1^{m}74$. Ils ont tassé de 50^{mm} à la clef, pendant le bétonnage.

Loc. cit. renvoi 79.

81. — Tolkmitt a construit (1890-1891) une arche, de 18^{m} de portée, $3^{m}40$ de montée, 10^{m} de largeur, du pont de Cöpenick à Berlin, sur une poutre en treillis, ménageant une passe de $7^{m}70$. Les fermes étaient appuyées aux naissances et sur deux palées. On les amenait de l'usine en trois morceaux.

Une ferme pesait 1.340^{k} ; le cintre, 8.550^{k}, — soit $47^{k}4$ par m. q. de surface couverte.

Zeitschrift für Bauwesen, 1892, p. 355 et suivantes.

82. — Pont de Valence (I, 143, 177).

83. — Passages supérieurs en béton pour remplacer des passages à niveau. — A la fin de 1900, on avait construit 110 ponts avec 6 cintres : l'un d'eux avait servi 24 fois.

Nouvelles Annales de la Construction, juin 1901, p. 88 : « *Cintres métalliques mobiles employés en Bavière* », par René Philippe, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

84. — Souterrains. — Au Mont-d'Or (Ligne de Frasne à Vallorbe, 1911-1914), les mêmes cintres ont servi 55 à 60 fois.

85. — Rocky River (II, 63, 101).

86. — Kempten (IV, 113, 117) ; Spokane (III, 285, 296).

87. — Putney (III, 231, 241) ; Edouard VII (I, 145, 184).

88. — Valence (I, 143. 179) ; arche centrale rive gauche.

89. — Valence (I, 143, 178) ; arches de rive, arche centrale rive droite.

90. — Svenkerud (III, 87, 151).

91. — Rocky River (II, 63, 101) ; Delaware (III, 285, 291).

Art. 3. — Poids et prix par m. q. de douelle.

	Ponts :	Voir :			Portée	Montée	Écartement des fermes	Par m. q. de douelle			A la clef en m/m	
		Tome	pages					Cube de bois	Poids de fer	Dépense	Surhaussement	Tassement
			Tableau synoptique	Monographie								
Cintres tout en métal — appuyés (2 palées entre les naissances)	Valence — Voûte : rive droite	I	143	178	$49^{m}20$	$10^{m}85$	$1^{m}66$	$0^{mc}44$	$183^{k}5$	$119^{f}10$	60^{mm}	50^{mm}
	rive gauche (2e emploi)				*id.*	*id.*		*0.30*	*180.9*	*34.70*	*50*	*41*
	centrale rive droite				id.	12 30	1.66	0.28	209.6	118.10	100	91
Cintres tout en métal — entièrement retroussés	centrale rive gauche	I	143	179	id.	id.	1.33	0.28	377.1	189.50	85	97
	Rocky River	II	63	101	85.34	24.64	7.06 (2 fermes)		584	201.80		44.5
Étage inférieur seul en métal (2 appuis entre les naissances)	Kempten	IV	113	117	Pont aval 63.80 / Pont amont 64.50 / 50.60 entre rotules	25.76 / 27.58 / 8.85	1.55	0.42		114.20	Bois Etage supér' 50 / Fer Etage infér' 23.4	

Les cintres métalliques sont fort chers de premier emploi.

CHAPITRE VII

SURHAUSSEMENT

Art. 1. — Cintres fixes. — On a souvent surhaussé les cintres fixes [92]. Or, ils tassent peu ; on ne sait pas à l'avance de combien, et il n'importe guère que la clef soit basse de quelques centimètres.

Les surhausser complique assez inutilement les épures.

Art. 2. — Cintres retroussés. — Les grands cintres retroussés tassent beaucoup [93] ; on ne peut prévoir de combien. On les surhausse, un peu d'après ce qui a été observé à des cintres comparables, beaucoup au sentiment.

Pour les cintres à câbles, c'est facile en serrant leurs écrous [94].

CHAPITRE VIII

ACCIDENTS

Un cintre s'est écroulé :

parce que les palées portaient sur des semelles de bois ayant servi et percées de trous [95] ;

parce qu'il était mal assemblé ou mal conçu ;

parce que de longs poteaux, mal contreventés, ont flambé ;

parce qu'une crue a emporté des palées.....

92. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 136 à 141.
93. — Voir les Tableaux synoptiques, p. 145.
94. — Voir Tome II, p. 73, renvoi 19.
95. — Voûte de $38^{m}50$ du pont Cornélius (IV, 182).

PRÉCAUTIONS DIVERSES

Art. 1. — Cintres ayant déjà servi. — Parfois les cintres employés à nouveau tassent beaucoup : il y est tout particulièrement nécessaire de mettre des feuilles de tôle dans les assemblages [98, 99, 100].

Art. 2. — Arrosage. — On a quelquefois arrosé les cintres pendant la construction des voûtes pour faire gonfler les bois ; puis on les a laissés sécher après clavage pour favoriser le décintrement [101].

Art. 3. — Incendie. — Pour prévenir ou arrêter un incendie, on organise une surveillance spéciale de jour et de nuit ; on dispose un réservoir d'eau tout près [102].

CHAPITRE X

APPAREILS DE DÉCINTREMENT

§ 1. — *BOITES A SABLE* [103]

Excellent appareil de décintrement, très simple. Pour les grandes voûtes, c'est, en France, à peu près le seul employé [104].

On a logé des boîtes à sable dans des caisses remplies de plâtre qui foisonne par l'humidité et remplit bien les vides [105].

Quelquefois, le cintre porte d'abord sur des billots qu'on remplace par des boîtes à sable au moment du décintrement [106]. Ce n'est pas à conseiller : une voûte en ciment, qui tasse très peu, est décintrée au changement.

98. — Au pont de Losde (Ligne de Tarascon à Ax, 1882-1883), arc, portée 30m60, montée 6m30, on a employé le cintre du pont voisin de Remoulines. Il a tassé : sur cintre, de 58mm ; au décintrement (60 jours après clavage, — MOV, chaux du Teil), de 1mm4.

99. — A une arche de 25m (la 2e à partir de la culée rive droite) du viaduc de la Sitter, le cintre tassa de 180mm, tassement énorme « *imputable pour la plus grande partie à ce fait que les cintres avaient déjà été employés à d'autres viaducs et que leurs assemblages avaient du jeu* ». (Observations pendant la construction et aux épreuves, par M. l'Ingénieur Acatos.)

Schweizerische Bauzeitung, 29 octobre 1910, p. 242. « *Der Sitterviadukt der Bodensee Toggenburgbahn* ».

100. — Au pont des Amidonniers, les cintres en 2e emploi n'ont pas plus tassé qu'au premier.

	Voûtes de 42m		Voûtes de 38m50	
	amont	aval	amont	aval
Premier emploi (Rive droite)	28mm	23mm	19mm	21mm
Deuxième emploi (Rive gauche)	24mm	25mm	18mm	17mm

101. — Teinach (IV, 204) ; Gravona (II, 184) ; Munderkingen (IV, 59) ; Walnut Lane (II, 90).

102. — Walnut Lane (II, 89).
Le 7 avril 1905, le feu a pris au cintre de Salcano (III, p. 149, S_6).

103. — On se servait d'abord de simples sacs remplis de sable, dont on réglait la sortie en serrant l'ajutage par une corde. Ce mode d'opérer a été imaginé, en 1847, par Beaudemoulin, au pont de Port-de-Piles ; mais il était employé par les Egyptiens pour mettre en place les obélisques. (Choisy, *Histoire de l'Architecture*, I, p. 38.)

104. — Toutes les voûtes françaises de 40m et plus ont été décintrées sur boîtes à sable, sauf :
a — sur coins : Fium'Alto (I, 89, 110) ; Berdoulet (II, 117, 128) ; Gravona (II, 179, 184) ;
b — sur vérins : Saint-Sauveur (I. 11, 29) ; Boucicaut (III, 231, 246) ;
c — avec roulettes descendant sur une surface de vis : Nogent-sur-Marne (I, 77, 81).

105. — Lavaur (II, 119, 137) ; Antoinette (II, 119, 144 bis).

106. — Claix (III, 13, 37) ; Grasdorf (IV, 125, 130).

§ 2. — *COINS*[107]

Les coins suffisent pour de petits cintres, jusqu'à 12^m par exemple. Mais, pour les grands, les bois s'impriment l'un dans l'autre, l'humidité les gonfle, et il est à peu près impossible de les faire glisser.

On les a cependant employés à des voûtes de 40^m et plus, récemment encore à l'étranger[108], — très rarement en France[104-a].

On les a munis de boulons à vis, et encore n'a-t-on pas toujours réussi à les « décoller »[109].

On desserre plus facilement trois coins : un mobile entre deux fixes[110].

On a employé des coins d'acier manœuvrés par des vis[111].

On a placé quelquefois les coins sous les couchis[112], sous les vaux[113].

§ 3. — *VÉRINS*[114]

Pour les voûtes de 40^m et plus, on les a employés : en France, très peu[115] ; en Allemagne, à quelques ponts inarticulés[116], à la plupart des ponts articulés[117, 118].

§ 4. — *DÉCINTREMENT PAR ÉCRASEMENT DE PIÈCES DU CINTRE*

On a entaillé les poteaux sous les vaux[119] ; — ruiné des billots placés au niveau du sol pour dégager des coins sous l'étage supérieur[120] ; — diminué progressivement, à coups de scie verticaux, des billots à base évidée (système Zuffer)[121, 122].

§ 5. — *DÉCINTREMENT EN DÉTENDANT DES CABLES*

Dans les cintres retroussés à câbles d'acier, on commence le décintrement du

107. — Boîtes à sable et coins : Edouard VII (I, 145, 184) ; Wiesen (I, 233, 241) ; Guggersbach (III, 15, 60) ; Coulouvrenière (IV, 79, 82).

108. — Ballochmyle (I, 39, 42) ; Big Muddy River (I, 223, 228) ; Walnut Lane (II, 63, 88) ; Victoria (II, 199, 204) ; Jaremcze (III, 83, 116) ; Canale (III, 183, 187) ; Mosca (III, 193, 200) ; Putney (III, 231, 241) ; Mehring (III, 231, 252) ; Schweich (III, 235, 268) ; Longuich (III, 237, 279) ; Spokane (III, 285, 296), (coins en fonte sous les couchis) ; Boberullersdorf (III, 287, 299) ; Elsen (III, 287, 300) ; Cassel (III, 287, 303) ; Munderkingen (IV, 53, 56) ; Göhren (IV, 125, 140).

109. — Luxembourg (II, 61, 72 bis). 110. — Gloucester (I, 87, 108) ; Morbegno (IV, 63, 71).

111. — « Screw wedges » (Pont sur la Rocky River, II, 63, 101).

112. — Gignac (I, 87, 105) ; Chester (III, 11, 29) ; Crespano (II, 11, 47) ; Nydeck (II, 13, 53) ; Bellows-Falls (III, 223, 226).

113. — Connecticut (I, 61, 71).

114. — Vérins et coins : à Reichenbach (IV, 169, 183) ; à Sidi Rached (II, 65, 110) ; vérins, coins et boîtes à sable : à Signac (I, 129, 132).

115. — Dès 1848, aux ponts de Cé,
Pour les voûtes de 40^m et plus, voir renvoi 104-*b*.
Au pont Boucicaut, ils ont servi à dégager les coins.

116. — Langenbrand (III, 89, 153).

117. — Tome IV : Garching (93, 98) ; Chemnitz (105, 109) ; Kempten (113, 117) ; Elise (127, 152) ; Illerbeuren (157, 160) ; Malling (167) ; Hochberg (167, 177) ; Cornelius (167, 181) ; Wittelsbach (171, 199) ; Moulins-lez-Metz (171) ; Mannheim (173), Neckarhausen (221, 233) ; Max-Joseph (223, 244) ; Prince Régent (223) ; Sigmaringen (251, 255).

118. — Au pont de Neckarhausen (IV, 221, 236), les vérins s'étaient enfoncés de 3^{cm} dans les semelles pendant le bétonnage. On les a encadrés de billots, qu'on a sciés au moment de décintrer.

119. — Annibal (I, 89, 113) ; Diable (I, 89, 117). 120. — Plauen (III, 15, 55).

121. — Décrit dans la monographie du pont de Krenngraben (III, 136).

122. — Système appliqué aux ponts autrichiens de : Krenngraben (III, 87, 136) ; Steyrling (III, 87, 139) ; Salcano (III, 87, 144) ; Palmgraben (III, 121, 165) ; Schalchgraben (II, 121, 170) ; Rothweinbach (II, 123, 172) ; puis en Suisse, aux ponts de : Lichtensteig (III, 89, 162) ; Krummenau (III, 91, 165) ; Cinuskel (II, 179, 190) ; Tuoi (II, 181, 195).

cerveau en détendant les câbles[123].

On fait ensuite descendre les reins sur coins, mieux sur boîtes à sable.

§ 6. — *DIVERS*

Au pont de Nogent[124], on a fait descendre des roulettes sur une surface de vis.

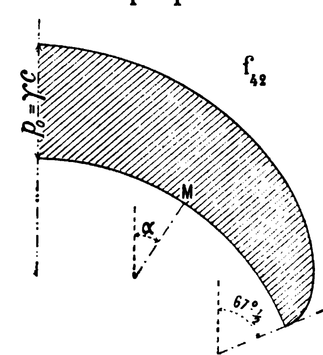
Au pont de la Delaware[125], les voûtes sont bâties sur fermes d'acier à trois articulations : en manœuvrant des tiges filetées, on a diminué la longueur des deux panneaux de clef.

CHAPITRE XI

CALCUL

§ 1. — *PRESSION NORMALE* p *PAR UNITÉ SUR LE CINTRE A UNE DISTANCE ANGULAIRE* α *DE LA CLEF*

J'ai proposé en 1886 la formule :



$$p = \gamma c \left(1 + \frac{c}{2R}\right) \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha} \quad [126]$$

γ est la densité de la maçonnerie ;
c l'épaisseur en M (f_{42}) à attribuer au 1er rouleau ;
R le rayon de courbure en M.

Pour les grands cintres, on néglige c devant $2R$, et on applique la formule simplifiée :

$$p = \gamma c \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha} \quad [127, 128]$$

Par elle, les cintres se calculent très facilement et très vite[129] ; j'ajouterai, très exactement : au pont de Luxembourg, les efforts des câbles mesurés par leurs flèches étaient ceux que donnait le calcul.

123. — Luxembourg (II, 61, 80).
Ponts du Sornin, de l'Arconce (voir leurs cintres, p. 146, 147).

124. — I, 77, 81. 125. — III, 285, 291.

126. — J'ai indiqué comment elle a été établie : Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, « *Construction des Ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », p. 508 à 527.

C'est une bonne formule pratique. Elle suppose que les voussoirs s'appuient sur le cintre dès 22° ½ sur l'horizontale, — ne glissent sur le cintre qu'à 45°. Ces deux hypothèses sont plus défavorables que la réalité.

En effet, soient : φ l'angle de glissement d'un voussoir sur mortier,
φ' — des voussoirs sur le cintre,
j'ai trouvé :

	Maximum	Minimum	Moyenne
pour φ, sur 712 expériences	90°	25°	37°
pour φ', sur 266 expériences	44°	25°	36° 30'

(Loc. cit. p. 506, 507.)

127. — On a ainsi calculé nombre de cintres : Castelet (II, p. 132) ; Lavaur (II, p. 137) ; Antoinette (II. p. 144 bis) ; Luxembourg (II, p. 72 bis) ; Amidonniers (I, p. 199) ; Gour-Noir (III, p. 104) ; Montanges (III, p. 65) ; Sornin, Arconce (p. 146),....

128. — On trouvera à l'APPENDICE, des tables de : $\log \sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha}$; $\sqrt{\cos \frac{4}{3} \alpha}$.

129. — Voir à l'APPENDICE, le calcul du cintre de Luxembourg.

§ 2. — *TRAVAIL PERMIS*

Art. 1. — Bois (Pin, Sapin). — *A. - Pièces fléchies (vaux, couchis).* — Le 1/5 de la charge de rupture, pratiquement $80^k/\overline{0^m01}^2$.

B. - Pièces comprimées. — *B_1. - Dans le sens des fibres.* — Soit φ « l'élancement » d'une pièce, c'est-à-dire le rapport :

$$\frac{L \text{ (longueur libre)}}{b \text{ (plus petit côté ou diamètre)}}$$

On peut admettre pour le travail par $\overline{0^m01}^2$ les formules suivantes :

Pièces rectangulaires (coefficient de sécurité de 1/5) :

$$\beta_m = \frac{80}{1 + \left(\frac{\varphi}{24}\right)^2}$$ [130, 131]

Bois ronds, pieux (coefficient de sécurité de 1/7) :

$$\beta_m = \frac{60}{1 + \frac{1}{3}\left(\frac{\varphi}{12}\right)^2}$$ [130, 131]

B_2. - Normalement aux fibres[132]. — Le 1/4 de la charge d'écrasement, 10^k à 12^k [133].

Art. 2. — Câbles d'acier. — L'acier des fils résiste couramment à 100^k, $120^k/\overline{0^m001}^2$.

J'ai admis 20 à 25^k par $\overline{0^m001}^2$ de surface utile.

CHAPITRE IX

POUR UN PONT A *n* ARCHES, COMBIEN DE CINTRES ?

Art. 1. — Pour 2, 3 arches. — On emploiera 2, 3 cintres.

Art. 2. — Pour 4 arches. — On a fait quelquefois 3 cintres, presque toujours 4.

Art. 3. — Pour 5 arches. — On a fait rarement 3 cintres[134] (Φ_1), souvent 4 [135].

130. — Voir pour ces formules : *Loc. cit. renvoi 126*, p. 529 à 534.

131. — On trouvera à l'APPENDICE une table numérique de β_m.

132. — Voir p. 132, art. 2. 133. — Voir p. 132, renvoi 6.

134. — Ponts : des Amidonniers (I, p. 193) ; de Belleperche, 5 ellipses de 33^m à 1/3,75.

135. — Ponts : de Lays sur le Doubs, 5 arcs très surbaissés de 26^m ; d'Ouroux sur la Saône, 5 ellipses de 33^m à 38^m, surbaissées à 1/4,5.

Φ_5 — Pont des Amidonniers



Pour un pont à voûtes très tendues, le mieux est d'employer 5 cintres et de tout décintrer le même jour[136]. Autrement, les piles tendent à se déverser du côté de la moindre poussée ; une arche, décintrée avant que les autres ne la contrebuttent, tasse trop.

Art. 4. — Pour plus de 5 arches. — On s'est contenté quelquefois de 3 cintres neufs[137].

Pour les pleins cintres, on en a, le plus souvent, employé 4, 5[138].

Pour les arcs surbaissés et les ellipses, le nombre en a fort varié[139]. Pour les arcs surbaissés, il est bon d'en faire 5.

Si on est pressé, on augmente le nombre des cintres[140].

Quand on emploie moins de cintres que de voûtes, on conduit les voûtes de façon à ne pas trop pousser les piles[138].

136. — Boucicaut (III, p. 243).

137. — Viaduc des Calvets, 6 ellipses de 27m à 1/3,85 ; pont de Puicheric, sur l'Aude, 6 arcs de 20m à 1/6.

138. — Appendice. — Viaducs.

139. — Ponts : d'Arciat, 7 arcs de 31m à 1/7,47, 4 cintres ; de Digoin, 9 arcs de 26m à 1/7,4, 6 cintres ; d'Avignon, 10 arcs de 40m à 1/8, 5 cintres (III, p. 270) ; de Saint-Loup, 7 arcs de 33m à 1/7,5, 5 cintres ; de Bléré, 6 ellipses de 24m à 1/3,65, 5 cintres ; de Cé, 11 ellipses de 25m à 1/3,27, 4 cintres ; de Lanne, sur l'Adour, 7 ellipses de 24m à 1/3,16, 4 cintres ; de Port-Sainte-Marie, 8 ellipses de 32m à 1/3,2, 6 cintres.

140. — Pont de Chalonnes, 17 ellipses de 30m au 1/4, 9 cintres.

TITRE III

COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE[1]

CHAPITRE I

ROULEAUX

§ 1. — *POURQUOI ON CONSTRUIT PAR ROULEAUX*

Le prix des cintres augmente avec le carré de l'ouverture et l'épaisseur de la charge : il importe donc de les charger aussi peu que possible, surtout les grands.

On construit à pleine épaisseur jusqu'au joint à partir duquel la voûte commence à s'appuyer sur le cintre : ce sera vers 60° de la clef pour les pleins cintres, les ellipses, les arcs peu surbaissés ; aux naissances pour les arcs assez et très surbaissés.

Au-dessus, on n'exécute pas du premier coup la voûte sur toute son épaisseur ; mais on l'étale par deux, par trois couches successives.

§ 2. — *COMMENT, DEPUIS 1800, ON A CONSTRUIT LES VOUTES DE 40ᵐ ET PLUS*

De 1800 à 1850, toujours à pleine épaisseur ; voici ce qu'on a fait ensuite :

Epaisseur à la clef e_0	de 1850 à 1880			aprés 1880			
	à pleine épaisseur	en 2 rouleaux	en 3 rouleaux	à pleine épaisseur	en 2 rouleaux	en 3 rouleaux	en 4 rouleaux
1ᵐ15 et au-dessous				Michelau, Ziegenhals, Huzenbach, Gross-Kunzendorf, Schwusen, Teinach, Chemnitz, Avignon, Boucicaut, Neuhammer, Elyria	Seythenex $e_0 = 0^m 90$		
1.20				Edouard VII, Wengern, Bellows-Falls, Krappitz	Saint-Pierre Verdun Ramounails	Amidonniers	
1.25				Orleans	Castelet	Amidonniers	
1.30	Alma				Brent Oloron Rébuzo Saulnier		
1.35				Putney, Wheeling			
1.40	Calcio			Worochta, Diveria	Céret Gravona Canale	Solis Rothweinbach Boïlefos	
1.45	Saint-Sauveur				Empereur-François	Luxembourg Lusserat	
1.50		Claix		Plauen	Verdon Escot Freyssinet	Antoinette, Pouch Krenngraben Strandeelven Montanges Constantine	
1.60	Mantes					Valence, Svenkerud	
1.65						Lavaur	
1.70		Signac Berdoulet		Wäldlitobel	Jamna	Gour-Noir Palmgraben Schalchgraben	
1.75		Fium'alto					
1.80	Prarolo	Bains-de-Lucques	Nogent-sur-Marne		Schwändeholzdobel Langenbrand	Wiesen	Krummenau
1.90	Collonges						
2.00		Cabin-John	Annibal Diable		Gutach	Steyrling	
2.10						Jaremcze, Salcano	

1. — Pour les voûtes en béton, voir p. 27.

Le nombre de rouleaux dépend de l'épaisseur de la voûte. En général, on a construit : en deux rouleaux, jusqu'à 1m40 d'épaisseur à la clef; en trois rouleaux, au-delà.

§ 3. — *ÉPAISSEUR DU 1er ROULEAU*

Art. 1. — Que porte le 1er rouleau ? — On constate que le 2e rouleau tasse peu[2], souvent ne tasse pas[3], que le 3e ne tasse pas.

Le premier fait office de cintre pour le 2e[3].

Le cintre et le premier rouleau ne sont pas également compressibles : ils ne portent pas ensemble le 2e. De plus, après le clavage du 1er rouleau, la température peut s'élever assez pour qu'il quitte le cintre et travaille seul.

Il doit être assez fort pour se porter et porter le 2e rouleau, sans flamber ou s'écraser[4].

Art. 2. — Rapport, dans les voûtes exécutées, de l'épaisseur du 1er rouleau e'_0, e'_1, à l'épaisseur totale e_0, e_1[5].

		2 rouleaux	3 rouleaux
à la clef : $\frac{e'_0}{e_0}$	minimum	0.326	0.33
	maximum	0.72	0.58
	en général	0.50	0.33 à 0.43
aux retombées : $\frac{e'_1}{e_1}$	minimum	0.25	0.28
	maximum	0.67	0.44
	en général	0.50	0.30 à 0.40

Il y a intérêt à avoir des rouleaux minces :

1° pour moins charger le cintre ;

2° pour bien remplir jusqu'à l'intrados, soit les fissures sur cintre s'il s'en produit, soit les joints secs ménagés pour les prévenir.

On a donné, de l'épaisseur du 1er rouleau, un calcul théorique[6, 7] : dans mes voûtes, je l'ai prise au sentiment[7bis].

Aux Amidonniers (I, 203), le 1er rouleau n'avait, au cerveau, qu'un moellon : nous avons fait ainsi à quantités de voûtes.

2. — Au pont du Diable (I, 116), pouzzolane et chaux grasse additionnée de chaux du Teil, le cintre tassa sous le 2e rouleau

3. — Pas de tassement après le clavage du 1er rouleau aux ponts du Castelet (II, 134), de Lavaur (II, 142), Antoinette (II, 148),....

4. — Si les rouleaux sont indépendants, on pourrait faire le 1er en matériaux plus résistants. A Cabin-John (III, 72), le 1er rouleau est en granit, le 2e en grès.

5. — Pour les épaisseurs des rouleaux, voir : Castelet (II, 132) ; Lavaur (II, 138) ; Antoinette (II, 146); Amidonniers (I, 203).

6. — Aux ponts de Wiesen (I, 242) et de Cinuskel (II, 191), le 1er rouleau a été calculé comme un arc élastique pour porter le 2e sans faire travailler le cintre.

7. — « *Lorsqu'on construit une voûte par rouleaux, au lieu de l'exécuter en une seule opération, on » réduit les distances à l'intrados des différents points de la courbe des pressions dans un rapport sensi- » blement égal à 1/2, quel que soit le nombre de rouleaux.* » (M. Résal : « *Traité des Ponts en maçonnerie* », Tome I, p. 211, Paris, 1887).

Ce calcul suppose que « *l'on décintrerait le premier rouleau avant de procéder à l'exécution du » second* ». (Loc. cit. p. 211, renvoi.)

Si on ne le fait pas, — et il est peu probable qu'on s'y risque, — « *le rapport des distances à l'intrados » des points correspondants des deux courbes des pressions relatives l'une à la voûte construite par rouleaux, » l'autre à la voûte construite en une seule fois, est égal : pour deux rouleaux à 3/4, pour trois rouleaux » à 2/3* ». (Loc. cit. p. 212, renvoi.)

« *Ce procédé* (la construction par rouleaux) *procure nécessairement une réduction de travail maximum » à la compression ou à l'extension à la clef.....*

» *....., par contre,..... dans la région du joint de rupture, les valeurs du travail maximum sont » augmentées.*

» *..... on peut corriger ce défaut,..... en réglant convenablement les épaisseurs relatives des rouleaux » successifs, qui doivent varier de la clef aux naissances et non pas rester constantes, comme nous l'avons » jusqu'ici supposé dans cette étude toute théorique.* » (M. Résal : « *Emplacements, débouchés, fondations. — Ponts en maçonnerie* », p. 217, Paris, 1896.)

« *L'épaisseur à la clef doit être partagée à peu près également entre les rouleaux successifs. Au joint de rupture, elle doit être attribuée en presque totalité au premier rouleau.* » (Loc. cit. p. 223.)

Dans ces indications toutes théoriques, on ne tient compte ni des mouvements des cintres, ni des matages des joints laissés vides dans chaque rouleau, lesquels créent ou modifient les pressions.

7 bis. — Voir I, 242, renvoi 6.

§ 4. — *ROULEAUX SOLIDAIRES OU ROULEAUX INDÉPENDANTS?*

Art. 1. — Rouleaux solidaires. — Presque toujours, les queues des assises de chaque rouleau forment dents d'engrenage avec les découpes nécessaires pour y encastrer les voussoirs du suivant [8].

La découpe est d'une assise à l'autre et non d'un moellon à l'autre dans la même assise.

Art. 2. — Rouleaux superposés indépendants. — Dans les voûtes romaines [9], puis du Moyen-âge [10], dans quelques voûtes modernes [11], les rouleaux sont superposés sans lien entre eux. C'est ainsi qu'on construit souvent les voûtes en briques [12, 13].

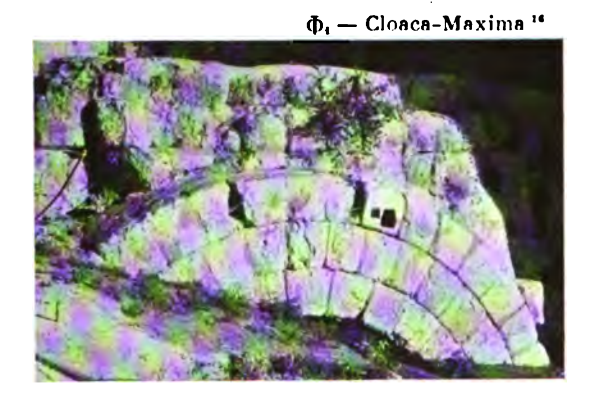
§ 5. — *ADOPTION SYSTÉMATIQUE DE LA CONSTRUCTION PAR ROULEAUX*

On a reproché à la construction par rouleaux de répartir très inégalement les charges, le premier rouleau portant presque tout.

Aussi quelques Ingénieurs l'ont-ils déconseillée [14, 15].

Mais, dans les voûtes construites sans joints secs, c'est-à-dire avec fissures, les efforts se répartissent plus mal qu'entre les rouleaux successifs d'une voûte

Φ_1 — Cloaca-Maxima [16]



8. — Les rouleaux n'étaient reliés que de distance en distance : au pont du Diable (I, 118), par quelques briques engagées; au pont Annibal (I, 114), par des voussoirs de tuf.

Ce n'est pas à imiter.

9. — Dans « *L'Art de bâtir chez les Romains* », Choisy donne des dessins de voûtes romaines en 2 rouleaux superposés (Basilique de Constantin, Thermes de Caracalla,...), en 3 (Panthéon).

L'Aqueduc Alexandrina est en 2 rouleaux, la Cloaca-Maxima (500 ans avant J.-C.), en 3 (Φ_1).

10. — Bandeaux en 2 rouleaux superposés aux vieux ponts de Céret (I. 118), de Tournon (II, 36).

11. — Pont de Cabin-John (III, 75).

12. — 3 rouleaux : pont sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch); pont de St-Waast (V, 105, renvoi 32), 20^{m} ; 2 rouleaux : pont des Bains de Lucques (III, 33).

Les Italiens construisent ainsi leurs voûtes : viaducs tout récents de la ligne Coni-Vintimille (1911-14).

13. — Pour les petites voûtes, on moule les briques, avant de les cuire, en forme de voussoirs pour regagner la différence de développement entre l'intrados et l'extrados.

14. — « *La maçonnerie sera exécutée.... sur toute l'épaisseur. Il est de règle, en effet, malgré des » exemples contraires, de ne point maçonner une voûte.... par zones parallèles à son épaisseur....* »

Dejardin : « *Routine de l'établissement des voûtes* », Paris, 1845, p. 247.

Lire dans le même sens : Morandière : « *Construction des Ponts* », p. 187 ; et, en sens contraire, Dupuit : « *Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie* », Paris, 1870, p. 283.

15. — La construction par rouleaux « *rend fort incertaine la position de la courbe de pression.... » Aussi y a-t-on renoncé en Allemagne pour les grandes voûtes surbaissées* ».

Centralblatt der Bauverwaltung, 1906, septembre, 5, p. 455 à 458 ; — 8, p. 462 à 465 ; 19, p. 483 à 486 : « ***Fortschritte im Bau weitgesprengter flacher massiver Brücken*** », von Landesbaurat Leibbrand in Sigmaringen.

16. — Date de la photographie : août 1908.

Il est possible qu'en théorie les efforts soient mal répartis, 3[e] rouleaux travaillent peu et ne fassent qu'empêcher le premier roule

Mais, en fait, on n'a jamais vu le premier rouleau s'écraser.

Pour fuir un danger qu'on n'a pas constaté, on ne peut pas avantages, très réels, de la construction par rouleaux : cintre lég rouleau fermé vite, — fissures faciles à bien remplir.

Cette méthode a rendu pratique et économique l'exécution des voûtes.

C'est par rouleaux qu'on a construit la plupart des grandes voûtes

L'expérience, « cette maîtresse impérieuse », a tranché.

CHAPITRE II

TRONÇONS ET CLAVAGES

ON COUPE LES ROULEAUX EN TRANCHES PAR DES JOINTS PERMETTANT A LA VOÛTE DE SUIVRE, SANS CASSURES, LES M DU CINTRE ; PUIS, ON MATE CES JOINTS

§ 1. — *NÉCESSITÉ DES JOINTS VIDES*

Le cintre est élastique : la maçonnerie ne le suit qu'en s'ouvran

Il y a fissure là où, à un appui moins flexible, succède un appui

Un cintre, même très fixe, très raide, très fortement chargé poids de la voûte plus que la culée ou la pile [19] : de là, une pr inévitable [20] au point où les voussoirs commencent à s'appuy d'autres pourront s'observer au droit de parties plus spécialer

17. — Je ne sache pas qu'on ait construit, par rouleaux, de voûte à 3 articulations

18. — De même qu'un aqueduc fondé sur deux terrains de compressibilité inégale ration, — de même que, dans une pile élargie, la nouvelle maçonnerie se sépare facilemer

19. — Au cerveau, les voûtes de souterrain se séparent du rocher.

20. — Les agents locaux s'entêtent souvent à les nier : il n'y a pourtant qu'à rega Nombre de constructeurs n'ont pas craint de les avouer.

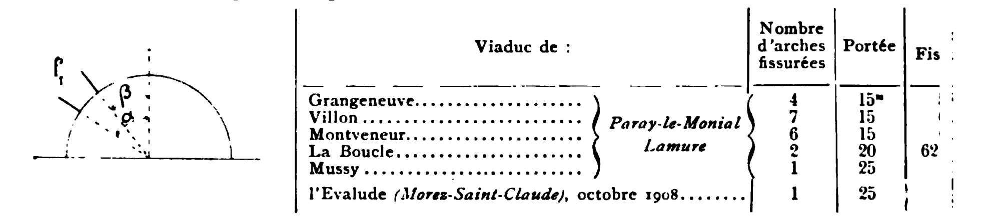
Voir les monographies des ponts de Fium'Alto (I, 110) ; Annibal (I, 112) ; des Bains d de Calcio (III, 102).

Viaduc de Puycheric, sur l'Aude (Ligne de Moux à Caunes), 1883-1886, 6 arcs de 2 premières arches, construites sans précautions spéciales, fissures légères aux naissance

Pont de Lourdes, sur le Gave de Pau, 1879, arc de 28[m] au 1/8 : large fente 1[er] rouleau.

Je puis citer, comme fissurées pendant la construction, plusieurs centaines de voû

21. — Voici, par exemple, les fissures à l'extrados observées à des viaducs en ple



Viaduc de :		Nombre d'arches fissurées	Portée	Fis
Grangeneuve	*Paray-le-Monial Lamure*	4	15[m]	
Villon		7	15	
Montveneur		6	15	
La Boucle		2	20	62
Mussy		1	25	
l'Evalude *(Morez-Saint-Claude)*, octobre 1908		1	25	

cintre : palées[22], abouts de vaux longs, extrémités d'une ferme retroussée d'un cintre marinier[23, 24], etc.... La fixité, la raideur, le chargement du cintre, le mode d'exécution de la voûte peuvent seulement réduire le nombre et l'amplitude des fissures, mais non les supprimer[25, 26, 27].

Acceptons-les, puisque nous ne pouvons pas les empêcher; mais localisons-les et soyons sûrs de les bien remplir.

Ménageons donc, là où elles peuvent se produire, — c'est-à-dire aux reins de la voûte et à tous les points fixes du cintre, — des joints vides qu'on bourrera, la voûte achevée.

§ 2. — *EMPLACEMENT DES JOINTS VIDES*

Art. 1. — Joints vides aux retombées seulement (c'est-à-dire clavages en trois points : clef et retombées). — Tout d'abord, on n'a ménagé de joints vides qu'aux retombées seulement, — là où la voûte commence à s'appuyer sur le cintre.

On a fait ainsi : en 1788, au pont de Maligny (arc peu surbaissé de 26^m)[28]; puis à des arcs très tendus : en 1853, aux 1er et 2e rouleaux du Petit-Pont, à Paris (arc de cercle de 31^m à 1/10)[29]; en 1862, au pont de Tilsitt, sur la Saône, à Lyon (arcs de cercle de 21^{m}40 à 22^{m}84 à 1/8, 1/10)[30]; en 1863-1864, à l'arche d'expérience de Souppes (arc de cercle de 37^{m}886 à 1/18)[31]; en 1882, au pont de Teinach[32].

Art. 2. — Joints vides aux retombées et en d'autres points. — En 1847, au pont au Double (arc de cercle de 31^m à 1/10), le premier rouleau, exécuté en ciment prompt, fut divisé en 4 grands voussoirs par des intervalles de 1^m, maintenus pendant leur construction par des encaissements et clavés les quatre ensemble[29].

22. — Fentes au droit des palées au pont Annibal (I, 114), dans le 1er rouleau des ponts de Saint-Pé (arc de 31^m au 1/5) et de Lourdes (arc de 28^m au 1/8), sur le Gave de Pau, construits en 1879.

Aux cinq voûtes du Point-du-Jour (30^{m}25), exécutées à mortier de ciment en un seul rouleau, légères fissures au droit des points d'appui de chaque ferme du cintre.

Annales des Ponts et Chaussées, 1870, 1er semestre, p. 87.

23. — Deux arches du pont de Marmande, sur la Garonne (1883-1885), ellipses de 36^m à 1/3,6, ont été établies sur cintre marinier pour une passe de 18^m Quoiqu'on eût chargé le cerveau du cintre, malgré les quatre coffrages des reins, pendant la construction du 1er rouleau, on observa de minces fissures à un grand nombre de voussoirs du bandeau.

24. — Pont d'Orléans (III, 262). A la voûte extrême rive droite, fissure entre la clef et l'appui du cintre marinier.

25. — Pont du Gour-Noir (III, 106). Les voussoirs des bandeaux au droit des joints secs étaient posés sur mortier. On constata une fissure au droit de l'emplacement de chaque clavage.

26. — Pont de Wiesen (I, 242). On a laissé ouvert, dans la partie construite à pleine épaisseur, le 1/3 extérieur du joint à 64° jusqu'après l'achèvement de la voûte. Au décintrement, on observa là une ouverture de 1^{mm}.

27. — Pont de Walnut Lane (II, 90). Bien que la voûte eût été attaquée en plusieurs endroits à la fois, on n'avait pas ménagé de vide aux retombées : elles s'ouvrirent.

28. — Gauthey : *Construction des Ponts*, p. 88.

29. — Claudel et Larroque : *Pratique de l'art de construire*, p. 489.

30. - M. Kleitz posa à sec sur liteaux de sapin les deux premiers rangs de voussoirs au-dessus des naissances et, après achèvement des voûtes, y coula du ciment. (Morandière : *Construction des Ponts*, p. 191.)

31 III, p. 375, art. 2. 32. — III, p. 204.

En 1873-74, même méthode au pont de Claix[33]; en 1883-84, au pont de Wäldlitobel[34], quatre attaques simultanées, aux reins et à 24° de la clef; en 1882-83, au pont du Castelet, six tronçons au 1er rouleau[35] : un s'est ouvert au-dessus d'une contrefiche du cintre.

Aussi, à Lavaur[36] (1883-84), avons-nous articulé le premier rouleau au droit de *tous* les points fixes du cintre, c'est-à-dire aux abouts de tous les vaux.

Le mode de construction de Lavaur, décrit Tome II, p. 138 à 142, a été appliqué, exactement, ou légèrement modifié, à nombre de grandes voûtes françaises[37], suisses[38], italiennes[39].

Art. 3. — Tous les joints vides. — Sur un cintre flexible[40], on ne sait pas où s'ouvrira la voûte ; au lieu de la diviser en un petit nombre de tronçons, on pose tout sur cales, puis on coule, on fiche ou on mate le mortier[41].

Aux grandes voûtes sous rails d'Autriche[42], du grand-duché de Bade[43], on a suivi la méthode « française »[44,45], mais en posant d'abord à sec les voussoirs dans chaque tronçon, puis en y bourrant les joints de mortier à l'état de terre humide, enfin, clavant au mortier sec les intervalles entre les tronçons.

§ 3. — *COMMENT, PENDANT LA CONSTRUCTION LE LA VOUTE, ON MAINTIENT LES JOINTS VIDES*

Art. 1. — Comment on soutient les assises posées à sec. — Les assises à sec sont tenues :

à l'intrados par des bandes de plomb[46,47] qui restent dans la voûte (plomb mou ordinaire, ou durci par 2 % d'antimoine), ou des tuyaux de plomb[48], lesquels sous les coups de matoir se moulent sur la pierre et ne font pas vibrer le cintre ;

33. — III, 38. 34. — II, 121, 158. 35. — II, 132. 36. — II, 119.

37. — Antoinette, 1883-84 (II, 119, 146) ; Céret, 1883-85 (II, 121, 162) ; Gour-Noir, 1888-89 (III, 81, 106) ; Pouch, 1890 (III, 83, 110) ; Freyssinet, 1890-91 (III, 83) ; Saint-Pierre, 1886 (I, 91, 121) ; Verdun-sur-le-Doubs, 1895-97 (I, 141) ; Verdon, 1905-06 (I, 129, 133) ; Luxembourg, 1899-1903 (II, 61, 76) ; Amidonniers, 1904-07 (I, 189, 203) ; Ramounails, 1906-08 (II, 179, 188) ; Escot, 1907-09 (II, 123) ; Montanges, 1908-09 (III, 17, 67) ; Lusserat, 1908-10 (III, 89, 157) ; Seythenex, 1908-10 (III, 171) ; Sidi-Rached, 1908-12 (II, 65, 112).

38. — Solis, 1901-02 (I, 53) ; Wiesen, 1907-09 (I, 242). 39. — Morbegno, 1902-03 (IV, 63, 72).

40. — Par exemple, les cintres à cours superposés d'arbalétriers de Perronet, certains cintres mariniers,.....

41. — Ponts : Mosca, à Turin, 1834 (III, 193, 201) ; Notre-Dame, à Paris, 1853 ; de Berdoulet, 1860-61 (II, 117, 128) ; Empereur-François, à Prague, 1898-1901 (I, 141) ; Prince-Régent, à Munich, 1900-01 (IV, 233).

42. — Jaremcze, 1893-94 (III, 83, 116) ; Jamna, 1893-94 (III, 83, 118) ; Worochta, 1893-94 (III, 83, 120) ; Krenngraben, 1904-05 (III, 87) ; Steyrling, 1904-05 (III, 87) ; Salcano, 1904-06 (III, 87, 145) ; Schalchgraben, 1904-05 (II, 121) ; Rothweinbach, 1904-06 (II, 123).

43. — Gutach, 1899-1900 (III, 85, 124) ; Schwändeholzdobel, 1899-1900 (III, 85, 128) ; Langenbrand, 1907-09 (III, 89).

44. — « *im Einklange mit französischen Bauausführungen....* » (Pont de Jaremcze, III, 110).

45. — « *im Einklange mit den œsterreichischen oder vielmehr den französischen Bauausführungen die hierfür vorbildlich waren.* » (Pont sur la Gutach, III, 124).

46. — Chester (III, 31) ; Mosca, à Turin (III, 201) ; Nydeck, à Berne (II, 54).

47. — Lavaur (II, 139) ; Antoinette (II, 146) ; Luxembourg (II, 80) ; Castelet (II, 133).

48. — Nous avons fait ainsi, récemment, à des voûtes de la ligne de Morez à Saint-Claude.

par des liteaux de bois dur[49], larges de 3 à 4^{cm}, plus minces de 3^{mm} ou 4^{mm} que le joint, et qu'on enlève ensuite ;

à l'extrados, par des cales de chêne à la demande, mieux par des coins et des barrettes de fer[50].

On a proposé de remplir les joints en coulant du plomb ou du zinc[51] ; mais ces métaux n'ont aucune adhérence avec la pierre, et le plomb résiste moins à la compression que le ciment.

Dans les joints, on a mis du sable, du mortier[52], du mortier maigre[53], du sable entre des bandes de mortier maigre[54].

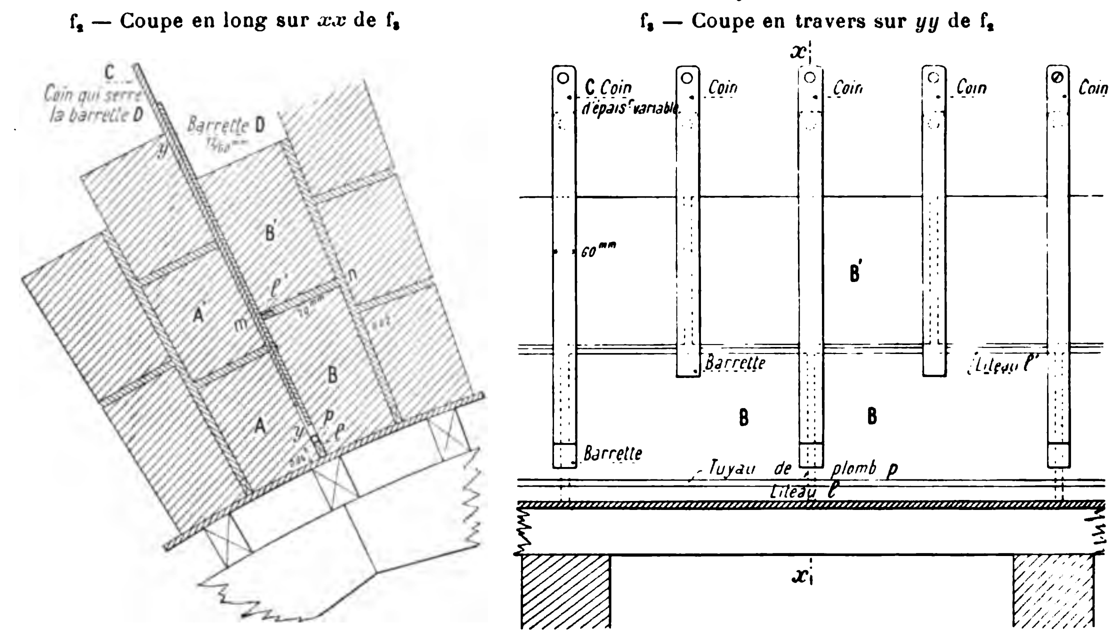
On ferme l'extrados par de vieux chiffons, des déchets de coton, des sacs,....

49. — Si on emploie des liteaux trop minces ou en bois tendre, ils cèdent ; les voussoirs se touchent et s'écrasent. Le fait s'est produit récemment à un pont à 3 arches en arc de 20^{m} au 1/5 : les 4 sommiers des bandeaux des 3 arches ont éclaté.

50. — Pont de Ramounails (II, 188).
On avait, auparavant, employé le même système aux reins d'une ogive de 30^{m} (pont de Fontpédrouse, V, p. 90). Bien que le joint y fut très incliné (60° sur la verticale) et le rouleau épais, on retira très facilement les coins et barrettes après matage.
Nous employons maintenant, très couramment, cette méthode.
Voici ce qui a été fait à l'arche de 25^{m} du Saillard, aux arches de 20^{m} du viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude) :

Viaduc de Morez — Comment étaient tenus les joints vides - 5^{cm}

f_2 — Coupe en long sur xx de f_3 — f_3 — Coupe en travers sur yy de f_2



l liteau s'appuyant sur les moellons bien équarris A (l'assise AA' est maçonnée) ;
p tuyau de plomb (tuyau à gaz) appuyé sur le liteau *l* ;
D barrette sur laquelle s'appuieront les moellons bien équarris BB' * ;
l' liteau sous le moellon B' : il retient le mortier du joint *m n* ; il tombe quand on enlève les barrettes.
Les barrettes D retiennent le mortier des joints verticaux et permettent de les ficher.

* A Ramounails (II, 188), on a suiffé coins et barrettes pour pouvoir les retirer facilement ; mais là le mortier adhère mal à la pierre ; un matage bien fait décale sûrement les barrettes.

51. — Voir V, p. 22, renvoi 129.

52. — « *Les coins en bois dur ont l'inconvénient que, souvent, on ne peut plus les enlever.....; aux ponts.... des Chemins de fer rhétiques, on a employé, à la place,.... des bandes de mortier.... avec plein succès.* » (Schweizer Ingenieur-Kalender 1912, p. 268.)

53. — M. Rabut, Ingénieur des Ponts et Chaussées : Viaducs de 18^{m} et 27^{m} de la ligne de Vire à Saint-Lô (1884).

54. — M. Sabouret, Ingénieur des Ponts et Chaussées : Passage supérieur, en arc de 28^{m}34, dans la station de Bussière-Galand (Ligne de Limoges à Périgueux, 1885).

Art. 2. — Coffrages, taquets entre les tronçons. — Au-dessus des assises sèches, aux reins des voûtes, dans les parties très inclinées sur la verticale, on tient les tronçons supérieurs par des coffrages, des taquets : on les a décrits dans la monographie du pont de Lavaur[55].

§ 4. — *COMMENT ON REMPLIT LES JOINTS VIDES ORDRE DES CLAVAGES*

Art. 1. — Les mater au mortier de ciment sec. — Au moment où vont commencer les clavages, la voûte est décomposée en tronçons formant un polygone articulé au droit de chaque point fixe du cintre. Il s'agit de raidir ces articulations.

On ne peut se contenter du simple coulis, trop souvent employé pour dissimuler les fissures.

Il faut, dans les joints vides, enfoncer un coin[56] qui crée entre les voussoirs des réactions normales aux lits.

On y parvient en matant les joints secs *au refus absolu* avec du mortier de ciment à l'état de sable humide.

Ce mortier acquiert de suite une dureté extraordinaire.

Art. 2. — Employer pour les matages le ciment et non la chaux[57]. — Avec de la chaux à 300^k (1/5 en poids), on obtient des pressions contre les joints presque aussi fortes qu'avec du ciment à 550^k (1/3) ; mais le mortier résiste bien moins à l'écrasement.

Si on augmente, au 1/3 par exemple, la quantité de chaux, on ne peut plus bourrer assez énergiquement.

Comme il s'agit de très petites quantités, la différence de dépense est insignifiante.

On matera donc toujours au ciment.

Art. 3. — Ordre des clavages. — On clave d'abord la clef, puis successivement tous les vides en descendant de chaque côté[58].

En général, on peut, au cerveau, enlever les taquets.

Aux coffrages inférieurs, on enlève les bois par chambres successives.

Le plus souvent, on ne commence le deuxième rouleau qu'après avoir clavé le premier[59].

55. — II, p. 139.

56. — On a clavé avec des coins en bois les petites voûtes de Luxembourg jusqu'au décintrement des grandes (II, p. 80).

57. — Annales des Ponts et Chaussées, 1904, 1er trimestre, p. 75 à 100 : « *Note sur le matage des joints de clavage dans les voûtes en maçonnerie* », M. Tourtay.

58. — Au pont d'Ouroux, sur la Saône (1906-10), on a fini par le 1/3 supérieur du joint de clef que l'on a maté modérément, et le 1/3 supérieur des joints de naissance, que l'on a maté énergiquement. (Note de M. Bouteloup, Ingénieur des Ponts et Chaussées, janvier 1909.)

59. — Aux ponts des Chemins de fer rhétiques, pour que le 1er rouleau ne se fendît pas sous le poids du 2e, on n'a fermé des joints secs du 1er rouleau qu'au moment de claver le 2e.
Schweizer Ingenieur-Kalender, 1912, p. 268.

Si les cintres ont été calculés pour la charge totale, on peut ne claver les joints de rupture qu'après achèvement du deuxième rouleau [60].

Art. 4. — Pratique des matages.

A. - Poids de ciment pour 1^{mc} de sable. — Avec 750^k, la résistance est moindre qu'avec 500^k [61] : un mortier trop riche se ramollit par le matage.

On mettra 500^k au moins, 600^k au plus [62].

B. - Sable. — Choisir le meilleur : le sable de calcaire broyé est parfois trop peu régulier.

C. - Quantité d'eau. — Le mortier doit être tel qu'on puisse le mater.

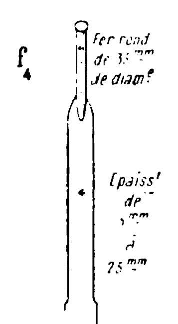
Il ne sera donc pas plastique comme le mortier ordinaire, mais sec, pulvérulent, à l'état de sable humide : comprimé à la main, il ne tient pas en boule.

Il y faut assez d'eau pour que le ciment prenne. Voici comment on l'évalue : le sable, même s'il paraît sec, retient toujours un peu d'eau, généralement plus de 4 % ; on la mesure en le faisant sécher au feu.

Dans les expériences faites, les quantités d'eau ont été les suivantes pour du mortier pulvérulent très sec [63] :

Dosage en poids		Poids approximatif de ciment pour 1^{mc} de sable (1500^k)	Quantités d'eau	
Ciment	Sable		pour % du poids du mélange sec	approximatives en litres pour 1^{mc} de sable (1500^k)
1	3	500^k	6.5 % [64]	130^l
1	2	750^k	7.5 %	169^l
Pour le dosage de 600^k, on aurait :				
1	2.5	600^k	7.0 % [65]	147^l

Il y a assez d'eau quand, sous l'action d'un matage énergique, le mortier « sue ».



D. - Instruments pour le matage. — Au pont des Amidonniers [66] (voûtes en moellons réguliers, à lits minces, bien équarris, pleins en queue), on a employé cinq types de matoirs en fer (f_4) :

largeur : 80^{mm}, 90^{mm}, 100^{mm}, 110^{mm}, 120^{mm}
épaisseur : 5^{mm}, 10^{mm}, 15^{mm}, 20^{mm}, 25^{mm}

60. — On a fait ainsi au pont de Marmande : ellipses de 3C^m à 1/3,6.

61. — *Loc. cit. renvoi 57*, p. 79.

62. — Le dosage des joints secs était, comme pour tout le mortier de la voûte : 650^k aux ponts de Lavaur (II, p. 135), Antoinette (II, p. 145), du Gour-Noir (III, p. 103); 600^k aux ponts de Luxembourg (II, p. 67), des Amidonniers (I, p. 193), d'Avignon (III, p. 270), d'Ouroux sur la Saône (voir renvoi 75) : 500^k au pont de Digoin sur la Loire (renvoi 75); 450^k au pont d'Arciat sur la Saône (renvoi 75).

63. — *Loc. cit. renvoi 57*, p. 78.

64. — Pour le même mortier, plastique, il fallait 11.2 % d'eau au lieu de 6.5 à 7.5 %.

65.

	Poids de ciment	Quantité d'eau	
		pour 1^{mc} de sable	% en poids du mélange
Ponts de Lavaur et Antoinette (II, p. 135 et 145)	650^k	130 à 150^l	6.04 à 6.65 *
Pont du Gour-Noir (III, p. 103)	650	117 à 156	5.44 à 7.77 **
Viaduc d'Arquejols (Langogne au Puy)	600	130 à 135	6.20 à 6.40 ***
Viaduc de Morez (Morez à Saint-Claude)	600	110 à 120	5.23 à 5.71 ****
Viaduc du Saillard (Morez à Saint-Claude)		108 à 120	5.14 à 5.71 ****

* Sable jugé sec sans expérience précise. ** Suivant l'état du sable. *** Sable séché. **** Sable séché au feu.

66. — I. p. 193.

Dans les voûtes en moellons ordinaires lités[67], il y a de grands joints : on emploie alors des matoirs épais, jusqu'à 50mm [68].

Pour pouvoir mater, il faut des joints assez larges, 20mm au moins si le rouleau est épais.

E. - Opération du matage. — Avant de mettre du mortier dans les joints secs, on les nettoie avec soin, on les arrose copieusement. Entre les parois très propres et encore humides, on introduit le mortier par petites hauteurs (2 à 3cm) : on le régularise avec des fiches de fer ou des liteaux de bois.

D'abord, un homme pilonne vigoureusement au matoir chaque couche de mortier à coups répétés ; puis, quand le mortier commence à résister, un homme tient le matoir, un autre tape à grands coups de masse sur la tête du matoir[69]. A chaque coup de masse, le matoir doit être déplacé de la moitié de sa largeur. Il y a deux équipes pour chaque joint à mater, chacune commençant le matage du côté de la tête et se rejoignant vers le milieu.

On arrête le matage, pour chaque couche, au moment où le mortier sue un peu d'eau.

Puis on recouvre les joints matés avec du sable, des nattes, des paillassons, des chiffons, que l'on entretient mouillés, afin que le ciment prenne sous l'eau.

Une voûte bien matée sonne comme un arc en métal.

F. - Présence de l'Ingénieur. — L'Ingénieur a le devoir d'assister à tous les matages et de s'assurer *par lui-même* qu'ils ont été bien faits.

Art. 5. — Coût du m. q. de joint maté[70]. — Il a coûté :

10f 70 au Viaduc du Saillard[71] (1908-09) (une arche en plein cintre de 25m et 4 de 12) } *Morez-*
12f 40 au Viaduc de Morez[71] (1910-11) (9 arches en plein cintre de 20m) } *St-Claude*
11f 10 au Pont de Saint-Loup[71] (1912-13) (7 arcs de 33m à 1/7,5), *La Ferté-Hauterive-Gannat.*

67. — Voir renvoi 76, p. 168.

68. — Viaduc d'Arquejols (Langogne au Puy, 1905-07), pleins cintres de 16m.

69. — Sur la ligne de Morez à Saint-Claude, les matages ont été plus vite et mieux faits par des mineurs habitués à manier la masse, que par des maçons et leurs aides.

70. — Voir Pont sur le Verdon (I, 135).

71.

Surface des joints matés	Viaduc du Saillard 203mq 43				Viaduc de Morez 447mq 39				Pont de Saint-Loup 800mq 24			
	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales	Quantités	Prix de l'unité	Dépenses partielles	Dépenses totales
Fournitures :												
Ciment Vicat	27k 3	0f 07	1f 91		20k 7	0f 07	1f 45		25k	0f 05	1f 25	
Sable	0mc 055	9. »	0.49		0mc 039	9 »	0.35		0mc 041	1.25	0.05	
Plomb (bandes ou tuyaux	3k 03*	0.90	2.73		1k **	0.90	0.90		0k 89	0.67	0.59	
Acier forgé } Réparation des	0k 04	1.20	0.05		0k 11	1.20	0.13		»	»	»	
Fer forgé } matoirs, barrettes.	»	»	»		0k 04	0.80	0.03		»	»	»	
Huile	»	»	»	5f 97	»	»	»	3f 15	0k 01	0.60	0.01	2f 97
Charbon	»	»	»		»	»	»		0k 75	0.04	0.03	
Chiffons, étoupes	0k 47	0.50	0.23		0k 18	0.50	0.09		0k 75	0.08	0.06	
Liteaux	2m59	0.20	0.52		0m99	0.20	0.20		»	»		
Coins en bois	0.37	0.10	0.04		»	»	»		»	»	0.98	
Coins en fer, barrettes, matoirs***	»	»	»		»	»	»		»	»		
Main-d'œuvre :												
Chef de chantier	»	»	»		»	»	»		0h 2m	0.90	0.03	
Maçons	»	»	»		3h 8m	0.80	2.51		2h 17m	0.74	1 69	
Manœuvres	7h 5m	0.58	4.11	4f 17	10h 19m	0.58	5.98	8f 66	8h 14m	0.46	3.79	6f 06
Forgerons	0h 5m	0.80	0.07		0h 13m	0.80	0.17		»	»	»	
Assurance 10 %	»	»	»		»	»	»		»	»	0.55	
Outils et faux-frais (1/20 environ)	»	»	»	0f 55	»	»	»	0f 59	*Frais génér. 13 % et bénéfice 10 %*			2f 07
Totaux				10f 70				12f 40				11f 10

* Bandes de 25mm × 20mm. ** Tuyaux à gaz, meilleurs et moins chers que les bandes.

*** Au Saillard, puis à Morez, on a fait les matages en régie. — Les barrettes, coins, matoirs ont coûté 3709f 76 (4637k 20 à 0f 80).

§ 5. — *ON PEUT CONSTRUIRE PAR TRANCHES SANS CONSTRUIRE PAR ROULEAUX*

Le sectionnement en tranches n'implique pas la construction par rouleaux : on peut fort bien établir des coffrages sur toute l'épaisseur de la voûte et la construire d'un seul coup [72, 73].

Mais ce joint est plus profond, donc plus difficile à bourrer; comme les reprises sont moins faciles, on en fera moins; on perd le bénéfice des rouleaux : légèreté des cintres, prompte fermeture de la voûte.

§ 6. — *ON PEUT CONSTRUIRE PAR TRANCHES QUELS QUE SOIENT LES MATÉRIAUX DE LA VOUTE*

J'écrivais en 1886 [74] : « *Le sectionnement des voûtes en tronçons.... s'applique » facilement aux voûtes en moellons ordinaires* » et « *restreint pour le corps de » la voûte l'emploi des moellons d'appareil aux seuls clavages* ».

Depuis, on a construit par tranches quantité de voûtes en moellons ordinaires [75] ; on en a même clavé en moellons ordinaires [76, 77].

Je préfère, pour un bourrage exact, claver en moellons équarris.

Dans les voûtes en briques, on ménage et on remplit facilement les joints vides [78, 79].

72. — Voûtes ⩾ 40m construites par tranches, à pleine épaisseur :

Intrados		Ponts	Dates	Voir			Portée	Epaisseur à la clef	Nombre de	
				Tome	pages Tableau synopt.	pages Monographie			tronçons	clavages
Arcs	peu surbaissé	Wäldlitobel	1883-84	II	121	157	41m	1m70	4	»
	assez surbaissé	Plauen	1903-05	III	15	56	90	1.50	6	11
	très surbaissés	Teinach	1882		193	204	46	1.00	2	3
		Boucicaut	1888-90		231	248	40	1.05	6	7
		Orléans	1904-05		233	260	43.85	1.25	10	11
		Avignon	1905-09		235	272	40	1.05	8	9

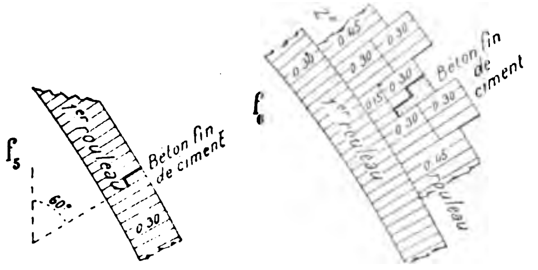
73. — Au pont d'Ouroux (voir renvoi 58), les trois premières voûtes ont été construites à pleine épaisseur, joints vides à la clef et à l'about de chaque vau.

74. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 472, p. 501 : « *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », M. Séjourné.

75. — Claix, arc de 52m à 1/6,46 (III, 36) ; Marmande, ellipses de 36m à 1/3, 6....

76. — Voûtes clavées en moellons ordinaires (M. l'Ingénieur en chef Tourtay) :

Intrados	Ponts :	Dates	Nombre d'arches	Portée	Surbaissement
Arcs très surbaissés	Iguerande, sur la Loire	1897-99	7	28m60	1/7,95
	Arciat, sur la Saône	1900-04	7	31	1/7,12
	Digoin, sur la Loire	1904-08	9	26	1/7,4
Anses de panier	Ouroux, sur la Saône	1906-10	5	33, 35, 38	1/4,53, 1/4,36, 1/4,3



77. — Nous avons ainsi clavé la voûte de 25m de l'Arconce, 1898 (Ligne de Paray-le-Monial à La Clayette) ; celle de 35m du Sornin, 1897 (Ligne de La Clayette à Lamure).

78. — Diveria (III, 85).

79. — A Saint-Waast (Ligne de Montauban à Castres), pleins cintres de 20m, construits en trois rouleaux de briques, sur des cintres très légers, on a simplement posé, au droit des points fixes, une demi-brique, et bourré ensuite le complément de l'épaisseur avec du béton fin de ciment (f_5, f_6).

§ 7. — *RÉACTIONS NORMALES AUX LITS*

CRÉÉES PAR LE MATAGE DES JOINTS VIDES AU MORTIER PULVÉRULENT

M. Tourtay et moi, avons demandé à M. Mesnager de faire, au Laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, des expériences pour les évaluer[80]. En voici le résultat :

En bourrant fortement un joint de 15^{mm} environ d'épaisseur avec du mortier de ciment sec[81], à 1/3 en poids (soit environ 550^{k} pour 1^{mc} de sable), on peut déterminer dans la maçonnerie une pression de 15 à 16^{k} par $\overline{0^{m}01}^{2}$.

Si, au lieu de bourrer un joint régulier de 15^{mm} environ d'épaisseur, on bourre un joint très irrégulier de 12^{mm} à 55^{mm}, on peut obtenir encore, avec du ciment de mortier au 1/3, sec, une pression de 8 à 10^{k} par $\overline{0^{m}01}^{2}$.

Ainsi, avec des matages bien faits, en nombre suffisant et aux points convenables, l'Ingénieur peut, à son gré, modifier la courbe de pression[82].

Les joints vides sont aux points les plus fixes du cintre. Ce sont ces points-là qu'on abaisse au décintrement.

C'est là que s'exercent les plus grands efforts, que doivent se produire, par conséquent, les plus grands tassements. Si donc les joints ont été fortement bourrés, on a créé des réactions normales au lit, soulagé le cintre et amorcé le décintrement, qui s'achèvera sans tassement appréciable[83].

§ 8. — *CONCLUSION :*

ADOPTION SYSTÉMATIQUE DES CLAVAGES MULTIPLES

En résumé, le système des clavages multiples :

localise les fissures pendant la construction et en assure à temps le parfait remplissage ;

80. — M. Tourtay en a rendu compte dans les Annales des Ponts et Chaussées, 1904, 1er trimestre, p. 75 à 100 : « *Note sur le matage des joints de clavage dans les voûtes en maçonnerie* ».

81. — Par rapport au mortier plastique à environ 11 % d'eau, la résistance du mortier sec (6,5 % d'eau), pilonné, est augmentée : à l'arrachement, de 30 à 40 % ; à l'écrasement, de 170 à 220 %.

82. — On a pu ainsi fermer au mortier sec une fissure ouverte *à l'intrados* d'un passage supérieur de 12^{m} (Ligne d'Etampes à Beaune-la-Rolande).
Annales des Ponts et Chaussées, 1905 (II, p. 232, 234, 240, 241).

83. — Voici pour 24 ponts, les tassements au décintrement t. de voûtes $\geqslant 40^{m}$ construites par tronçons :

Intrados	Ponts :	Tome, page	Portée	t_v	Intrados	Ponts :	Tome, page	Portée	t_v
Plein cintre	Solis	55	42^{m}	0^{mm}	Arcs assez surbaissés	Gour-Noir	103	62^{m}	1^{mm}3
Ellipses surbaissées	Amidonniers	I 193	42.46	0 à 2.3		Pouch	110	47.85	2.2
	Verdon	133	40	0.6		Krenngraben	134	40	2
Ellipses surhaussée	Wiesen	235	55	0		Salcano	141	85	6
Arcs peu surbaissés	Lavaur	135	61.50	0.6		Langenbrand	152	59	1 à 2
	Antoinette	145	50	0.6		Lusserat	III 155	45.70	3.6
	Céret	160	45	0		Lichtensteig	161	42.82	0
	Luxembourg	67	84.65	6 et 5		Krummenau	164	63.26	3.2
	Rothweinbach	II 171	41	0		Guggersbach	59	50.20	0
	Escot	174	56	0		Montanges	62	80.29	0.2 à 0.4
	Ramounails	186	40.30	1.6		Seythenex	177	41.19	0
	Cinuskel	189	46.98	0					
	Tuoi	194	47.71	0					

crée, entre les voussoirs des clavages, des réactions qui soulagent le cintre et préparent le décintrement, en réduisent le tassement et préviennent les fissures ;

hâte l'exécution de la voûte, puisqu'on y peut faire autant d'attaques que de vaux[84] ;

ne laisse guère subsister, au décintrement, que les déformations élastiques.

Il s'applique, convenablement modifié, aux voûtes de toute ouverture, construites par rouleaux ou à pleine épaisseur, en moellons ordinaires ou d'appareil, à mortier de chaux ou de ciment, sur cintres fixes ou retroussés.

Enfin la maçonnerie des clavages est la meilleure de la voûte.

Nous l'appliquons systématiquement à *toutes* nos voûtes[85].

CHAPITRE III

QUELQUES PRÉCAUTIONS

Nos ciments sont durs : on ne peut dégrader les joints sans faire éclater la pierre. On disposera dans tous les joints vus des liteaux en sapin ayant une épaisseur un peu inférieure à celle du joint.

A l'extrados, les joints seront tenus creux et bien lissés pour découvrir de suite les fissures qui pourraient se produire et qu'on explique trop facilement par le retrait du mortier.

Dans les reprises des tronçons, tous les vieux mortiers sont repiqués et les joints secs lavés à grande eau.

Tous les voussoirs doivent être vigoureusement assujettis par de forts maillets en bois qui répartissent bien le choc sans écraser la pierre; on l'impose dans le Cahier des Charges : on ne l'obtient guère.

84. — A Luxembourg, il y avait 10 attaques simultanées, 20 tronçons : on a fait chaque rouleau en 8 à 10 jours et la voûte entière en un mois et demi (II, p. 78).

85. — Dans les souterrains, nous matons de même le joint de reprise des pieds-droits sous la calotte de la voûte.

TITRE IV

DÉCINTREMENT

CHAPITRE I

MEILLEURE ÉPOQUE A CHOISIR, QUAND ON EST LIBRE, POUR CLAVER ET DÉCINTRER

Le froid contracte les matériaux, abaisse la clef des voûtes, fend les tympans, les corniches ; la chaleur dilate les matériaux, élève la clef des voûtes, resserre les tympans, les corniches.

C'est le froid qui est dangereux.

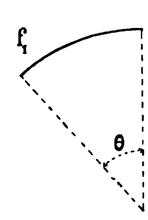
C'est donc en hiver, quand la clef est basse, les matériaux contractés, qu'il conviendrait de claver la voûte et de construire les tympans : mais il est assez rare qu'on le puisse.

An décintrement, la voûte se contracte par sa mise en pression et s'abaisse : s'il fait plus froid qu'au clavage, elle s'est encore contractée par le froid : les deux abaissements s'ajoutent [1] ; s'il fait plus chaud, elle s'est dilatée : les deux effets se contrarient [2].

Si on décintre en été, le soleil a pu contracter le cintre en desséchant ses bois : c'est ainsi que se sont décintrées, toutes seules, la voûte de la Gravona [3], toutes les voûtes de Constantine [4].

CHAPITRE II

ÉTAT D'AVANCEMENT DES TYMPANS AU MOMENT DE DÉCINTRER



On a souvent décintré les pleins cintres et les arcs peu surbaissés, les tympans montés jusqu'à 60° de la clef; les ellipses, les tympans faits jusqu'au milieu de la montée; nus, les arcs pour lesquels θ est $< 60°$ (f_1).

Quelquefois, avant de décintrer, on a chargé le cerveau [5] : on a élevé, sur le dos de la grande voûte, des piles de voûtes d'élégissement [6].

Si on a cambré la voûte pour une certaine disposition des charges, il faut, avant de décintrer, mettre dessus ces charges-là [7].

C'est ainsi qu'on a décintré : le pont Boucicaut [8], les tympans montés jusqu'au niveau de l'extrados; le pont de Luxembourg [9], quand les petites voûtes étaient fermées sur cintre, clavées seulement avec des coins; l'ogive du pont de Fontpédrouse [10], la clef chargée d'une pile de 15^m de hauteur.

1. — On a dû, à Luxembourg, claver par la chaleur et décintrer par le froid.

2. — Au Castelet (41^m), décintré en hiver, tassement de 2^{mm} (II, 117). Au pont de Lavaur ($61^m 50$), clavé par 12° de froid, décintré en été, tassement de $0^{mm}6$ (II, 119).

3. — II, 185. 4. — II, 113. 5. — Crespano (II, 11); Gour-Noir (III, 81).

6. — Sidi-Rached (II, 65); Schalchgraben (II, 121); Rothweinbach (II, 123); Escot (II, 123); Ramounails (II, 179); Steyrling (III, 87); Salcano (III, 87); Lichtensteig (III, 89); Krummenau (III, 91).

7. — Voir Tome III, p. 367 : Relation entre quelques formes de funiculaires et quelques dispositions des charges.

8. — III, 249. 9. — II, 80. 10. — V, 90.

Quelquefois, on a décintré, les tympans faits[11] et même l'ouvrage achevé[12].

Si on ne ménage pas de joints de dilatation, il convient que la voûte ait été maçonnée au ciment, qu'elle ait été clavée et les tympans faits par le froid ; sinon, l'hiver suivant, les tympans se fendront.

S'ils sont coupés par un joint de dilatation, on peut les achever avant de décintrer[13].

CHAPITRE III

TEMPS PENDANT LEQUEL ON LAISSE LA VOÛTE SUR CINTRE

Les anciennes voûtes étaient en chaux grasse, qui ne faisait prise que très lentement. On décintrait, les mortiers encore plastiques, et on ne s'effrayait pas si une voûte tassait de 1 pouce par toise, soit de 1/144e de sa portée[14].

Avec nos chaux, qui prennent en moins de deux jours, surtout avec nos ciments, qui prennent en moins de douze heures, on décintre toujours le mortier pris : il faut qu'il le soit assez pour résister ; on attend le plus qu'on peut.

La règle attribuée à Morandière, — un jour sur cintre par mètre de portée, — est tout juste suffisante, même pour une voûte à ciment.

Il faut plus attendre en hiver qu'en été.

Il faut plus attendre pour une voûte en béton que pour une voûte appareillée : il y a plus de mortier ; il y durcit moins vite.

Toutes les fois qu'on décintre trop tôt, des joints s'ouvrent[15].

Il faut décintrer très doucement, sans choc. Quand une crue décintre brusquement, il y a danger de fissures[16].

Les voûtes construites par rouleaux doivent rester longtemps sur cintre. Il faut, en effet, qu'au moment du décintrement, les mortiers des maçonneries, suivant une même normale à l'intrados, aient fait une prise à peu près égale, c'est-à-dire que l'intervalle entre leur exécution soit négligeable devant le temps laissé sur cintre.

11. — Alma (I, 139) ; Mantes (I, 141) ; Jaremcze (III, 83) ; Jamna (III, 83) ; Svenkerud (III, 87).

12. — Annibal (I, 89) ; Diable (I, 89) ; Verdon (I, 129).

13. — *Voûtes inarticulées :* Connecticut (I, 61) ; Guggersbach (III, 15) ; Gutach (III, 85) ; Elsen (III, 287) Cassel (III, 287).

Voûtes articulées : Garching (IV, 93) ; Grasdorf (IV, 125) ; Wallstrasse (IV, 125) ; Hochberg (IV, 167) ; Cornélius (IV, 167) ; Elise (IV, 127) ; Illerbeuren (IV, 157) ; Reichenbach (IV, 169) ; Maximilien (IV, 169) ; Wittelsbach (IV, 171) ; Moulins-lez-Metz (IV, 171) ; Gräveneck (IV, 211) ; Inzigkofen (IV, 221) ; Neckarhausen (IV, 221) ; Prince-Régent (IV, 223) ; Max-Joseph (IV, 223).

14. — A Neuilly, — 5 voûtes de 120 pieds (39^{m}) en anse de panier au 1/4, — on clava le 26 juillet 1772 : on commença le décintrement le 14 août, 18 jours après ; on l'acheva le 3 septembre. Le tassement a été :

immédiatement après la pose de la clef........	10	pouces	5	lignes	(0^{m}282)
au commencement du décintrement...........	12	—	6	—	(0^{m}338)
après décintrement..........................	18	—	6	—	(0^{m}500)
après la pose du pavé et des parapets.........	22	—	»	—	(0^{m}595)
5 ans après achèvement du pont..............	23	—	6	—	(0^{m}636)

Perronet : *Description des Projets et de la Construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres....* Tome I. — Imprimerie Royale, MDCCLXXXII, p. 49 et 107.

Voici les tassements de l'arche centrale du pont de Mantes (120 pieds), 1764 :

avant le décintrement.........................	13	pouces	6	lignes	(0^{m}365)
après le décintrement,.........................	18	—	6	—	(0^{m}500)
15 mois après.................................	20	—	7	—	(0^{m}557)

Perronet, *loc. cit.* p. 73.

15. — Plein cintre de 25^{m} de l'Evalude (Ligne de Morbier à Morez), clavé le 26 septembre 1898, décintré le 30 : fissures de 1^{mm} à l'extrados, à 44° et 35° de la clef. (Tassement de la clef : 8^{mm}.)

16. — Pont de Verdun-sur-le-Doubs (I, 167).

TASSEMENT DE LA CLEF AU DÉCINTREMENT

Nota. — Dans les Tableaux, § 1, § 2, on a écrit en caractères gras ce qui concerne les voûtes que l'on sait avoir été clavées en plusieurs points au mortier de ciment sec maté. Pour la nature des matériaux et la composition du mortier des voûtes de 40^m et plus, voir Tableaux, p. 8, 9, 10.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40^m et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	**Tassement** en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* de la chaux

§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES*

Art. 1. — Voûtes à mortier de chaux.

A. — *Chaux grasse.*

PT	Lavaur (V^x Pont), I, 86	1773-91	Anse de panier	48^m73	1/2.5	1145 j.	juin	65^mm	
	Mosca, III, 192	1834	Arc de cercle	45	1/8.18	20		153	
MAV	Chester, III, 10	1833-34		60.96	1/4.76	»		63 à 67	pays
Br	Annibal, I, 88	1868-70	Anse de panier	55	1/3.92	217	6 avril	69	[16]
	Diable, I, 88	1871-72		55	1/4.06	88	20 octobre	115	[17]

B. — *Chaux maigre.*

Br	Bains-de-Lucques, III, 10	1874-77	Arc de cercle	47.84	1/6.71	12	10 août	183	

C. — *Chaux hydraulique.*

MAV	(V^e de) la Gascarie [18]	1894-97	Plein cintre	20	»	10		< 18	Teil
MEV	Lanne [19]	1871	Anse de panier	24	1/3.2	»		19 à 79	Echoisy
	Saulnier, III, 12	1882	Arc de cercle	43	1/5	39	octobre-nov.	52	
	Losde [20]	1882-83		30.60	1/5	60	10 août	95	Teil
	Pouch, III, 82	1890		47.85	1/3.68	55	4 août	2.2	
	Amélie-les-Bains [21]	1890-92	Plein cintre	**26**	»	30		**1**	
	(V^e de) Saint-Georges [22]	1898	Plein cintre	16	»	8 à 14	février-mars	0.3 à 2	
	(V^e de) Mouillero [22]							1 à 1.6	
MOV	Chalonnes [23]	1863-65	Ellipse	30	1/4 (Sur 17 arches, tassement)	max. 48, min. 196, moy. 67	24 novembre, 28 juin	98, 8, 36	Doué
	Port-Sainte-Marie [24]	1876-77		32	1/3.2 (Sur 8 arches, tassement)	max. 20, min. 44, moy. 28	15 janvier, 28 décembre	28, 0, 11	Teil
	Saubusse [25]	1880-82		24	1/3.3 (Sur 7 arches, tassement)	max. 35, min. 35, moy. 33	13 mai, 2 juin	80, 20, 36	Saint-Astier
	Bléré [26]	1897-1900	Anse de panier	24	1/3.65	< 32		16	Teil
	V^t du Saillard [27]	1909	Plein cintre	**25**	»	50	10 décembre	**0**	
	Calcio, III, 80	1877-78	Arc de cercle	42	1/3.53	32		48	Pallazzolo
Br	Belleperche [28]	1898	Ellipse	33	1/4	tassement max. 41, min. 62	20 octobre, 3 février	119, 48	Teil
	(V^e des) Calvets [28]	1898		27	1/4	tassement max. 17, min. 30	21 janvier, 4 mai	53, 8	
	(V^e de la) Samponne [28]	1898		27	1/4	tassement max. 47, min. 35	8 mars, 12 juillet	112, 11	
	Diveria, III, 84	1901-02	Arc de cercle	40	1/4	15		60	Palazzolo

Art. 2. — Voûtes à mortier bâtard.

MOV	Oloron, I, 38	1881-82	Plein cintre	40	»	59		3	

16. — On a ajouté à la chaux grasse du ciment de Vassy : 1/8 en volume pour le 1er rouleau, 1/4 pour le 2e, 1/2 pour le 3e (I, 88). C'est pour cela que le pont Annibal a été indiqué, au tableau de la p. 9, dans les voûtes à mortier bâtard.

17. — On a ajouté à la chaux grasse un peu de chaux du Teil : 1/8 en volume pour le 1er rouleau, 1/4 pour le 2e, 1/3 pour le 3e (I, 88).

18. — Ligne de Carmaux à Rodez (Exposition 1900 : Notice, Travaux publics, p. 555). 19. — Route nationale n° 117 de Bayonne à Perpignan (id. 1878, p. 20).

20. — Ligne de Tarascon à Ax. 21. — Ligne d'Elne à Arles-sur-Tech (id. 1900, p. 612). 22. — Ligne de Quillan à Rivesaltes (id, p. 592, p. 596).

23. — Ligne d'Angers à Niort (Morandière, Construction des Ponts, Tome I, p. 374).

24. — Ligne de Condom à Port-Sainte-Marie (Exposition 1878 : Notice, Travaux publics, p. 306).

25. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1885, p. 645 : Note sur la Construction du Pont Saint-Jean sur l'Adour, à Saubusse (Landes). M. Trépied, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

26. — Route nationale n° 76 de Nevers à Tours (Exposition 1900 : Notice, Travaux publics, p. 16). 27. — Ligne de Morez à Saint-Claude.

28. — Ligne de Castelsarrazin à Beaumont.

§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES (Suite)*

Art. 3. — Voûtes à mortier de ciment.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40m et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
	Signac, I, 128	1871-72	Anse de panier	40m	1/3.25	68 j.	3 avril	0mm	Boulogne
	Teinach, III, 192	1882	Arc de cercle	33 apparente	1/10	42		43	
	Empereur-François, I, 140	1898-1901	Anse de panier	42.34	1/4.95	8	9 décembre	21	
	Gutach, III, 84	1899-1900	Arc de cercle	64	1/3.97	27	9 juin	21	Schiffer-decker
PT	Schwändeholzdobel, III, 84			57	1/4	42	13 juillet	21	
	Strandeelven, III, 84	1902-04	Arc d'anse de p.	41	1/3.64	357	14 septembre	1.5	
	Steyrling III, 86	1904-05	Arc de cercle	**70**	1/4.45	»	été	**9**	
	Salcano III, 86	1904-06		**85**	1/3.90	38	8 août	**6**	Spalato
	Svenkerud III, 86	1905-07	Arc d'anse de p.	44	1/6.66	108	2 mai	5.5 à 7	
	Seythenex, III, 170	1908-11	Arc de cercle	41.19	1/4.10	15	30 novembre	0	*Vicat*
	Céret, II, 120	1883-85	Arc de cercle	**45**	1/2.31	79	30 janvier	**0**	
L	Bellows-Falls, III, 222	1899		42.67	1/7	arche est : 21 arche ouest : 30		0	
	Montanges, III, 16	1908-09		**80.29**	1/3.92	68	7 novembre	**0.2 à 0.4**	*Vicat*
	Krummenau, III, 90	1910-11	Arc d'anse de p.	63.26	1/4.57	29	8 septembre	3.2	
	Boucicaut, III, 230	1888-90	Arc de projection de chainette	**40**	1/8	229-207 185-67	5 juin	**8, 13** **6, 11**	*Vicat*
	Saint-Martin-Lys [32]	1896		**34**	1/3.84	**26**	3 février	0.8 à 2.4	
	Luxembourg, II, 60	1899-1903	Arc cambré	**84.65**	1/2.73	voûte aval : 93 voûte amt : 10	octobre septembre	**6** **5**	*Vicat*
MAV	**Orléans,** III, 232	1904-06	Arc de projection de chainette	**43.85**	1/7.56	73-63-54 68-62	29-31 mai 24-25 juillet	**8-6.6-8.8** **5-7.4**	*Candlot*
	Avignon, III, 234	1905-09		**40**	1/8 sur 10 voûtes	tassement max. 76 min. 86 moy. 89	18 novembre 23 juillet	**17.6** **6** **10.7**	*Pavin de Lafarge maritime*
	Cinuskel, II, 178	1910-12	Arc d'anse de panier	46.98	1/2.32	10	6 juillet	0	
	Tuoi, II, 180	1911-12		47.71	1/2.23	11	5 août	0	
	Eaux-Salées [32]	1911-13	Plein cintre	**50**	»	38	12 août	**0.1 à 0.3**	
	Castelet, II, 116	1882-83	Arc de cercle	**41.20**	1/2.94	60	26 janvier	**2**	
	Lavaur, II, 118	1882-84		**61.50**	1/2.24	135	7 mai	**0.6**	*Vicat*
	Antoinette, II. 118	1883-84		**50**	1/3.14	99	10 septembre	**0.6**	
	Gour-Noir, III, 80	1888-89		**62**	1/3.73	52	28 septembre	**1.3**	
	Villefranche-de-Conflent [31]	1889-91		39.35	1/2.31	53	22 juillet	1.9	
	Verdun-sr-le-Doubs, I, 140	1895-97	Ellipse	**41**	1/4.47	48	7 octobre	amont : 19 aval : 24	*Vicat*
	Axat [29]	1898-99	Plein cintre	30	»	29	22 juin	0.7 à 1	
	Aliès [29]					33	1er septembre	0.6 à 0.7	
	Rébuzo, I. 38	1898-1900		40	»	30	17 mai	1.2	Teil *(grappier)*
MEV	**Valence** I, 142 voûtes de rive	1901-05	Arc d'anse de panier, puis de parabole	**49.20**	1/4.65	292 (RD) 29 (RG)	8 août 14 mars	**20** **33**	
	Valence I, 142 voûtes interm.				1/4	505 (RD) 39 (RG)	26 février 26 mars	**33** **3**	
	Amidonniers, I, 188	1904-07	Ellipse aplatie aux reins	**46**	1/4.17	299 236	14 mars 22 décembre	**0** **0**	*Vicat*
				42	1/4.10	159-169 125-131	23 août 8 mai	**0** **0.9 à 1.3, 1.6 à 2.3**	
				33.50	1/4.08	223-232 100-107	23 août 19 juin	**0 - 0** **0.4 à 0.3, 0.7 à 1.5**	
	Verdon, I, 128	1905-06	Ellipse	**40**	1/4	35	19 septembre	**0.6**	
	Ramounails, II, 178	1906-08	Arc d'anse de p.	**40.30**	1/3.12	23	18 juillet	**1.6**	
	Escot, II, 122	1907-09	Arc de cercle	**56**	1/2.99	89	10 octobre	**0**	*(laitier)*
	Lichtensteig, III, 88.	1907-09		42.82	1/3.71	»	juin	0	

29. — Ligne de Quillan à Rivesaltes (Exposition 1900, Notice Travaux publics, p. 582). 30. — id. (id., p. 585, 590).
31. — Ligne de Prades à Olette (id., p. 617). 32. — Ligne de Miramas à L'Estaque. — Voir APPENDICE.



§ 1. — *VOUTES INARTICULÉES (Suite)*

Art. 3. — Voûtes à mortier de ciment *(Suite)*.

Matériaux du queutage	Ponts : *Les chiffres après les noms des ponts indiquent, pour les voûtes de 40m et plus, le Tome et la page du Tableau synoptique.*	Dates	Intrados	Portée	Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
	Berdoulet, II, 116	1860-61	Arc d'anse de p.	40m	1/3.44	20 j.		10mm	
	Claix, III, 12	1873-74	Arc de cercle	52	1/6.46	42	10 avril	1 à 2	*Vicat*
	Ile-Verte, à Grenoble	1896-99	Arc	39.20 et 37	1/7.84, 1/7.54		3 février	0 à 5	
MOV	Solis. I, 52	1901-02	Plein cintre	42	»	21	21 juin	0	
	Palmgraben, II, 120	1904-05	Arc de cercle	49	1/3.39		20 août	3	
	Krenngraben, III, 86	1904-05		40	1/4		8 mai	2	
	Lusserat, III, 88	1908-10		45.70	1/4.63	18	26 octobre	3.6	Boulogne
Petits MOV	Plauen, III, 14 45 °/。 de mortier	1903-05	Arc d'anse de p.	90	1/5	8 mois	juillet	82	cerveau : *Stern* reins : *Vorwohler*
Br	Gimone	1874-75	Ellipse	33	1/3.14	58 j.	9 mars	3 à 4	
	Weisenbach, III, 216	1885	Arc	40	1/8	1		0	*Dyckerhoff et fils*
	Bellefield, III. 14	1896-97	Arc de cercle	45.72	1/4.10		sept.-octobre	47.2	
	Ave du Connecticut, I. 60	1899-1901 1904-1908	Plein cintre	45.72	»		commencement de l'été	< 2	
	Big Muddy River, I, 222	1901-03	Ellipse	42.67	1/4.67	voûtes nord 178 centr. 41 sud 102	19 janvier 15 15	67 à 70 21.3 à 24.4 51.5	
	Mehring, III, 230	1903-04	Arc d'anse de panier	46	1/7.45	49-46-57-63		8-30-10-15	
	Schweich, III, 234	1905-06				»		20	
B	Guggersbach, III, 14	1906	Arc de cercle	50.20	1/6.19	92	15 décembre	0	
	Walnut Lane, II, 62	1906-08	Arc d'anse de panier	70.71	1/3.32	1re vte : 1 mois 2e vte : 6 semaines	juillet novembre	3.2 3.2	
	Trittenheim, III, 234	1907-08		46	1/7.45			20	
	Wiesen, I, 232	1907-09	Ellipse surhaussée	55	1/1.65	4	14 octobre	0	
	Avenue Edmondson, I, 90	1908-09	Arc d'anse de panier	42.37	1/3.17	½ vte nord 83	3 mars	61	*Alpha*
	Rocky River, II, 62	1908-10		85.34	1/3.46	vte sud 19	28 septembre	11.6	
	Longuich, III, 236	1909-11	Arc de cercle	46	1/7.45		15 septembre	20	
	Boberullersdorf, III, 286	1908-09	Arc d'anse de panier	58.10	1/6.31	1 mois 1/2	août	100	
B peu armé	Elsen, III, 286	1909-10		46	1/9.02		octobre	110	
	Cassel, III, 286	1909-10		57.50	1/10.99		août	40	*Vorwohler*
	Spokane, III, 284	1909-11	Arc de cercle	85.65	1/2.47		8 juin 10 août	0	

Art. 4. — Que conclure des tassements observés ? — On constate ce qu'il était facile de prévoir.

Le tassement est plus grand avec mortier de chaux qu'avec mortier de ciment; plus grand pour les voûtes en briques, parce qu'elles ont beaucoup de joints; plus grand en hiver qu'en été.

On le réduit à très peu de chose par les clavages multiples au mortier de ciment sec.

A le calculer d'avance d'après l'intrados, les matériaux, l'époque du clavage et du décintrement, on perdrait son temps.



§ 2. — *VOUTES ARTICULÉES (mortier de ciment)*

Matériaux du queutage	Ponts :	Tome IV, page	Dates	Intrados	Portée entre appuis	Entre rotules : Portée	Entre rotules : Surbaissement	Temps sur cintre après clavage, en jours	Date du décintrement	Tassement en *mm* au décintrement	Provenance et *marque* du ciment
PT	Höfen	38	1885	Arc très surbaissé	41m	28m	1/10	35 j.		amont : 42mm5 ; aval : 38mm	Blaubeuren
PT	Baiersbronn	38	1889		40	33	1/10	28		92mm	
PT	Prince-Régent	222	1900-01		62.40	63	1/9.69	55	29 mai	34	Karlstadt *Dyckerhoff et fils*
PT	Max-Joseph	222	1901-02		64	60	1/10	42	25 juin	35 | 37	*Dyckerhoff et fils*
PT	Morbegno	62	1902-03		70	66	1/7	28	4 mai	126	
PT	Cornelius	166	1902-03		44	41	1/12	28	8 mai	22	
PT	Maximilien	168	1903-05		45.87	44	1/8.98	50	13 juin	20	
MEV	Marbach	38	1886-87		43.50	32	1/10.32	42		39	
MOV	Göhren	124	1903-04		60	60.56	1/8.89	42	1-2 décemb.	31.3	
B	Munderkingen	52	1893		59	50	1/10	28	4 septembre	30 | 38	Ehingen, Blaubeuren
B	Inzigkofen	220	1895		47.90	43	1/9.81	35	12 octobre	7.5 | 7.7	Blaubeuren
B	Coulouvrenière	78	1895-96		40	40	1/7.41	voûte RD : 79 ; — RG : 74	9 décembre ; 28 janvier	24.5 ; 31.2	Reuchenette ; Le Pasquier
B	Neckarhausen	220	1899-1900		59.40	50	1/11	56	28 août	12.1 | 12.5	Blaubeuren
B	Grasdorf	124	1899-1900		40	40.39	1/8.93	49	12 septemb.	24	
B	Malling	166	1899-1901		40	40.50	1/8.56	»		»	
B	Hochberg	166	1901-03		39.40	40	1/7.41	1 mois 1/2	mi-novemb.	»	
B	Reichenbach	168	1902-03		44	41	1/10	45 j.	12 mai	21 | 18	
B	Illerbeuren	156	1903-04		59	57.16	1/5.82	30	2-3 novemb.	9	*Dyckerhoff et fils*
B	Neckargartach	168	1903-05		40	40	1/8 à 1/10	28	10 novemb.	13 (moyenne)	Lauffen
B	Wallstrasse	124	1904-05		65.45	57	1/9.83	63		7.4	Blaubeuren
B	Wittelsbach	170	1904-05		44	41	1/10	49	30 mai	31	
B	Moulins-lez-Metz	170	1904-05		44	44.70	1/8	50	29 juillet	7	
B	Mannheim	172	1905-08		59.50	58.50	1/10.6	»	25 octobre	vte RG : 150 ; vte RD : 224	
B	Kempten (pont à 4 vtes) (2 ponts jumeaux P_1, P_2)	112	1906	Arc peu surb.	63.80	50.60	1/5.52	42		Pont P_1 : 29 ; — P_2 : 3	*Dyckerhoff et fils*
B	Elise	126	1906-07	Arc très surb.	47.50	43.50	1/9.89	»		24	
B	Garching	92	1907-08	Anse de pan.	44.35	38.55	1/5.33	51	27 juin	15	Blaubeuren
B	Gräveneck	210	1911-12	A. assez surb.	48	48.42	1/6.25	46	4 janvier	14	

Les mouvements des voûtes articulées devraient être plus grands que ceux des inarticulées. On ne le constate pas : l'effet des articulations est masqué par d'autres causes [33].

§ 3. — *CONTINUATION DU TASSEMENT APRÈS DÉCINTREMENT*

Le tassement continue pendant quelque temps après le décintrement, sans qu'on charge la voûte [34, 35], surtout celui des voûtes en briques qui ont beaucoup de joints [36].

33. — IV, p. 27.

34. — A l'arche rive droite du pont de Navilly, sur le Doubs, l'abaissement au décintrement (16 novembre 1785) fut de 103mm ; dix heures plus tard, il était de 118mm et atteignit finalement 176mm.
De Dartein : « *Etude sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », Volume IV, p. 186.

35. — Voir page 171, renvoi 14.

36. — Ouvrages en briques de la ligne de Castelsarrasin à Beaumont, — intrados en ellipse, — mortier de chaux :

	Portée	Montée	Tassement au décintrement	Augmentation au bout de : 1 jour	5 jours	12 jours
Viaduc de décharge des Calvets.....	27m	6m75	53mm	17mm	27mm	»
Pont de Belleperche................	33m	8m25	90mm	29mm	»	39mm



Art. 1. — Voûte construite à pleine épaisseur. — Au décintrement, si la voûte est construite à pleine épaisseur sur cintre fixe, ses appuis (piles, culées,) recevront brusquement tout ce que portait le cintre ; leur compression et celle du sol s'ajouteront au tassement de la voûte : si le sol est compressible, les piles s'enfonceront, les culées s'enfonceront et reculeront [37].

Si elle est construite sur cintre retroussé, ses appuis auront tassé au fur et à mesure de la construction.

Art. 2. — Voûte construite par rouleaux. — Jusqu'à sa fermeture, le premier rouleau pèse, sur le sol si le cintre est fixe, sur les piles ou les culées, s'il est retroussé.

Le premier rouleau clavé reporte sur les appuis de la voûte une partie du poids du second.

Art. 3. — Dans le tassement total, faire la part des appuis. — On mesurera le tassement des appuis. Pour les voûtes sur cintres fixes des ouvrages fondés sur pilotis [38], il n'est pas du tout négligeable.

CHAPITRE V

ACCIDENTS AU DÉCINTREMENT : FISSURES, ÉCRASEMENTS

Il y a fissure aux reins, si on décintre trop tôt [39,40].

Si les joints du bandeau sont trop minces, — surtout si le queutage est en moellons bruts, — les voussoirs des reins se touchent par leur arête et éclatent [41].

C'est au décintrement que l'on constate la nécessité des voûtes homogènes [42].

37. — Au pont de la Coulouvrenière, les culées ont reculé au décintrement de 2^{mm} et 5^{mm} ; après, de 4^{mm} et $1^{mm}5$ (IV, p. 84).

38. — Alma (I, p. 156, 157). — Boucicaut (III, p. 249) :
Pont de Saubusse. — Tassement, en *mm*, des piles fondées sur pilotis à têtes noyées dans du béton :

	1re pile (RD)	2e	3e	4e	5e	6e
amont..............	1^{mm}	10^{mm}	19^{mm}	2^{mm}	7^{mm}	5^{mm}
aval................	2	8	8	7	5	8

Loc. cit., p. 173, renvoi 25, p. 654.

39. — Voir plus haut, p. 172, renvoi 15.

40. — Pont de Port-Sainte-Marie sur la Garonne (Ligne de Port-Sainte-Marie à Condom) ; 8 arches en ellipse : portée, 32^{m} ; montée, 10^{m} ; épaisseur à la clef : bandeau, $1^{m}20$; corps, $1^{m}35$.
A toutes les arches, et de chaque côté, fissure imperceptible à un joint voisin du milieu de la montée.

41. — On sait cela depuis longtemps. Au pont de Navilly, sur le Doubs, on observa des épaufrures aux reins de la voûte. Gauthey, dans une lettre du 22 octobre 1785, se plaint « *qu'on n'ait pas démaigri les arêtes en douelle des voussoirs inférieurs* ».
M. de Dartein. *Loc. cit. renvoi 34.*

42. — Voir plus haut, p. 16, art. 2.



COMMENT ON MESURE LES TASSEMENTS

On ne peut pas mesurer au niveau à bulle les très petits tassements des voûtes en ciment à clavages matés.

Au pont de Lavaur [43], on a opéré ainsi : dix-huit leviers au 1/20e étaient fixés sur chaque tête, aux angles de 0°, 10°, 23°, 43°, 53°, et douze autres à l'extrados des joints à 55° de la clef. (Les contacts se faisaient par des couteaux et étaient assurés par des poids ou des bandes de caoutchouc.)

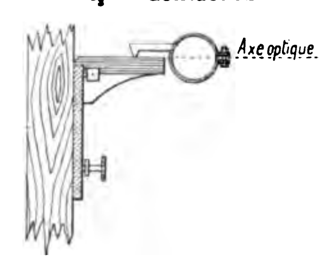
Mesure des tassements

f_1 — Ensemble

Règle pendante invariablement fixée au pont de service

En sept points de l'extrados de la voûte, sur l'axe, des lunettes plongeantes [44] étaient disposées comme l'indiquent f_1, f_2.

f_2 — Contact K



L'extrémité K était fixée au pont de service. Le centre O, c'est-à-dire la voûte, tassant de t = OO', on lisait sur la mire M ce tassement t multiplié par le rapport D : d (lequel à Lavaur variait de 500 à 700) ; d devant être très exactement apprécié, le contact K se faisait par deux couteaux reposant l'un sur l'autre à angle droit (celui de la lunette divisé en 0m0005), et était assuré par une forte bande de caoutchouc.

Ce procédé a été, ensuite, conseillé par M. Rabut. Je renvoie à l'excellent mémoire où il a indiqué les méthodes et décrit les instruments qui ont sauvé tant de ponts métalliques, injustement menacés [45].

43. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 476 à 478.

44. — Les leviers et lunettes étaient au droit des abouts des contrefiches du cintre, points correspondant aux plus grands tassements.

45. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1896, p. 374 : *Renseignements pratiques pour l'étude expérimentale des Ponts métalliques.*

ÉPREUVES DES VOÛTES EN MAÇONNERIE

Art. 1. — Voûtes inarticulées. — Les voûtes en maçonnerie travaillent, en général, fort loin de leur rupture : on n'utilise qu'une faible partie de leur résistance ; on ne leur a pas imposé d'épreuves et, en fait, on ne les éprouve pas[1].

C'est fort regrettable.

On devrait toujours observer l'effet des surcharges, non parce qu'il peut y avoir danger, mais pour s'instruire.

Si, cependant, l'effort se rapprochait de la charge d'écrasement, par exemple pour les ponts sous rails sous des machines plus lourdes, surtout pour les larges ponts-route en deux minces anneaux, il deviendrait nécessaire d'éprouver les voûtes, c'est-à-dire de mesurer, comme pour une travée métallique, ou un pont suspendu, leurs déformations, leurs vibrations.

Art. 2. — Voûtes articulées. — Celles-là, on les a quelquefois éprouvées[2]. Il est fort bon de le faire.

1. — On a éprouvé la voûte de Jaremcze (III, p. 117).

2. — Voir, Tome IV :
Voûtes semi-articulées : Höfen, p. 44 ; Morbegno, p. 72 ; Coulouvrenière, p. 85.
Voûtes articulées : Illerbeuren, p. 164 ; Mannheim, p. 208 ; Inzigkofen, p. 230 ; Neckarhausen, p. 237.

MOUVEMENTS ET FISSURES DUS AUX CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE

NÉCESSITÉ DE S'EN PRÉOCCUPER POUR LES GRANDES VOÛTES

JOINTS DE DILATATION

§ 1. — *VARIATION DE LONGUEUR D'UN PRISME :*

1° SOUS UNE COMPRESSION NORMALE β ($^{kg}/\overline{0^m01^2}$) ; — 2° POUR UNE VARIATION DE TEMPÉRATURE $\tau°$; — 3° PAR IMBIBITION

Art. 1. — Formules. — Considérons un prisme droit de longueur L (en mètres), de base Ω en $\overline{0^m01}^2$, pressée à son centre de gravité par une force normale N (en kg.).

Soient :

$$\frac{N \text{ (en kg)}}{\Omega \text{ (en } \overline{0^m01^2})} = \beta_m \text{ (pression moyenne, en } ^{kg}/\overline{0^m01^2})$$

$$E \text{ (coefficient d'élasticité)} = \varepsilon \times 10^9 \; (^{kg}/1^{mq}) = \varepsilon \times 10^5 \; (^{kg}/\overline{0^m01^2})$$

$$\alpha \text{ (coefficient de dilatation linéaire)} = \alpha' \times 10^{-6}$$

La variation en microns (μ) de la longueur du prisme est :

sous la pression β_m, si la déformation est proportionnelle à l'effort (hypothèse de Hooke) :

$$\Delta_\beta L \text{ (en } \mu) = \frac{10\,\beta_m}{\varepsilon} L \text{ (en mètres;}$$

pour une variation de température $\tau°$:

$$\Delta_\tau L \text{ (en } \mu) = \alpha' \tau° L \text{ (en mètres).}$$

Il y faut ajouter l'allongement dû à l'imbibition ou le raccourcissement dû à la dessication.

Art. 2. — Quelques nombres.

Matériaux	Variation de longueur en μ par 1^m de longueur					
	pour une compression de $1^{kg}/\overline{0^m01^2}$		pour une variation de température de 1° $\Delta\tau = \alpha'$ [1, 2]	pour une imbibition		
	pour ε =	$\Delta\beta = \frac{10}{\varepsilon}$		à saturation	au 1/10°	au 1/100°
Pierre {	0,6 - 1 - 2	16 μ - 10 μ - 5 μ	»	»	»	»
Pierre { de Vianne (Pont des Amidonniers)	5 (en moyenne)	2 μ	6 μ, 7 μ	80 μ à 120 μ (en moyenne 100 μ)	10 μ	1 μ
Mortier de ciment	»	»	11 μ, 14 μ	»	»	»
Béton de ciment	2	5 μ	14 μ	»	»	»
A titre de comparaison : Acier à ponts	*22 - 25*	*0,4 μ*	*11 μ*	»	»	»
	A égalité de travail, l'acier se déforme de 5 à 40 fois moins que la pierre.					

1. — Pour L = 100^m, $\alpha' = 8$, $\tau = 20°$: $\Delta L \text{ (en } \mu) = 8 \times 20 \times 100 = 16.000\ \mu = 16^{mm}$.
Ainsi un mur de 100^m, pour un abaissement de 20°, se contracte de 16^{mm} : la somme de ses fissures sera 16^{mm}.

2. — On a trouvé pour α' :

7, 9 - granit, d'après la largeur des fissures du parapet du viaduc de Lapradelle (Quillan à Rivesaltes),
Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 1er trimestre, p. 175 à 195 : « *Etude sur les effets de la dilatation dans les ouvrages d'art en maçonnerie, viaducs et barrages-réservoirs* », M. Bouffet, Inspecteur général honoraire des Ponts et Chaussées;

11, 8 - mortier de ciment à 1 p. 2 en volume,
4, 6 - maçonnerie de briques à mortier de ciment,
Annales des Ponts et Chaussées, 1863, 1er semestre, p. 178 : « *Expériences sur la dilatation des maçonneries* », M. Bouniceau, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées;

3 à 4 — maçonnerie de briques à mortier de chaux,
Observations faites, sur ma demande, en 1910-11, sur le parapet du viaduc de Poix (Amiens-Rouen), 12 arches de 16^m50, par les soins de M. Rossignol, Ingénieur en chef de la Compagnie du Nord.

Art. 3. — Les changements de température raccourcissent un prisme plus que les charges usuelles. — Pour le calcaire de Vianne du pont des Amidonniers, la variation est la même :

$6\,\mu$ — pour une compression de 3^k, une variation de 1°, une imbibition de 6 %;
$100\,\mu$ — pour une compression de 50^k, une variation de 17°, une imbibition à saturation.

Ainsi, les changements courants de température déforment les maçonneries autant, ou plus, que leurs charges et surcharges usuelles[3] : il s'en faut donc préoccuper dans les grandes voûtes.

Art. 4. — Compression, si on contrarie la dilatation. — Si on empêche la dilatation de $\alpha'\,\tau^\circ\,L$ correspondant à une élévation de température τ°, on produit un effort de compression β_c[4], tel que : $\frac{10\,\beta_c\,L}{\varepsilon} = \alpha'\,\tau\,L$ d'où $\beta_c = \frac{\varepsilon\,\alpha'\,\tau}{10}$

Pour $\alpha' = 6$, et $\tau = 25^\circ$: $\beta_c = 15\,\varepsilon$ Pour $\varepsilon = 2$, $\beta_c = 30^k/\overline{0^m01}^2$: $\varepsilon = 5$, $\beta_c = 75^k/\overline{0^m01}^2$

§ 2. — *COMMENT VARIE LA TEMPÉRATURE DES VOUTES*

La température moyenne d'une voûte par 24^h est à peu près la même que celle de l'air[5]; ses températures extrêmes s'en écartent moins[6] que celles de l'air.

§ 3. — *MOUVEMENTS OBSERVÉS AUX CLEFS DES VOUTES*

Sous l'action des variations de température, les voûtes sont toujours en mouvement : « elles ne dorment jamais » ; souvent leurs clefs (pour celles à ciment) s'abaissent autant et plus qu'au décintrement.

Ponts :	Voir Monographie Tome (III ou IV) page :	Matériaux du queutage	Portée $2a$	Montée b	Surbaissement	Tassement au décintrement	Variation h du niveau de la clef en *mm*	quand la température varie de	à	soit de τ
				VOUTES INARTICULÉES — Arcs surbaissés — Tome III						
Claix	39	MOV	52^m	8^m05	1/6.46	1 à 2^{mm}	7^{mm}	—7°	+45°	52°
Teinach	203	PT Grès	33	3.30	1/10	43	1	»	»	2.5
Gour-Noir	108	PT Granit	60	16.10	1/3.73	1.3	11 à 15	hiver	été	»
Boucicaut	250	MAV Calc.	40	5	1/8	11 à 18	6 à 8	hiver rigoureux 1890-91		
Gutach	125	PT Grès	64	16.10	1/3.97	21	18	—12	+22	34
Schwändeholzdobel	128	PT Grès	57	14.25	1/4	21	17	—17	+25	42
Plauen	57	MOV Phylitte	90	18	1/5	82	75	été 1908	hiver 1909	»
Lusserat	158	MOV	45.70	9.87	1/4.63	3.2	6	—4	+13	17
				VOUTE SEMI-ARTICULÉE — Arc très surbaissé — Tome IV						
Morbegno	73	PT Granit	70	10	1/7	»	33	+26	—8	34

VOUTES ARTICULÉES — Arcs très surbaissés — Tome IV

Ponts	Tome	Matériaux	Portée totale	Entre rotules Portée $2a_r$	Entre rotules Montée b_r	Entre rotules Surbaissement	Tassement	en mm	de	à	soit de τ	Coefficient de dilatation α : $\alpha' = 10^{-6}\alpha = \frac{10^{-6}\,h}{\left(\frac{a_r^2}{b_r} + b_r\right)\tau}$
Grasdorf	137	Béton	40^m	40^m39	4^m52	1/8.9	24	12	—5	+22	27	4.7
Wallstrasse	150		65.45	57	5.80	1/9.83	7.4	48.5	—12	+27	39	8.5
Elise	153		47.50	43.50	4.40	1/9.9	24	15	—12	+27	39	3.4
Neckargartach	186		40	40	5	1/8	13	10	»	»	35	3.4
Neckarhausen	237		59.40	50	4.54	1/11	12.4	am^t 20 | av^t 29	3 juin	30 janv.	»	»

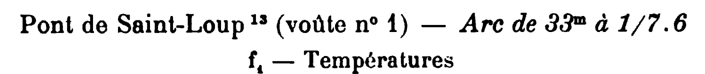
3. — A l'intrados des naissances du pont de Morbegno, la compression est : sous la surcharge, 11^k4; sous le poids mort, 22^k7; pour un refroidissement de 34°, 36^k (IV, p. 74).

4. — Dans des murs de revêtement faits en hiver, il y a eu en été des maçonneries écrasées; les mortiers de chaux sont moins sensibles que ceux de ciment; ceux de tuileau pilé le sont peu ; les briques le sont moins que le calcaire dur.
Annales des Travaux Publics de Belgique, avril 1912, M. Denil, Ingénieur principal des Ponts et Chaussées.

5. — Graphiques, f_1 à f_4, p. 182. 6. — Viaduc de Poix (Amiens-Rouen), 12 arches de 16^m50. — Températures extrêmes : de l'air, —4° à +38°; du corps du parapet, —2°5 à +29°; du corps de la voûte, 0° à +19°. 8. — Tome IV, p. 25.

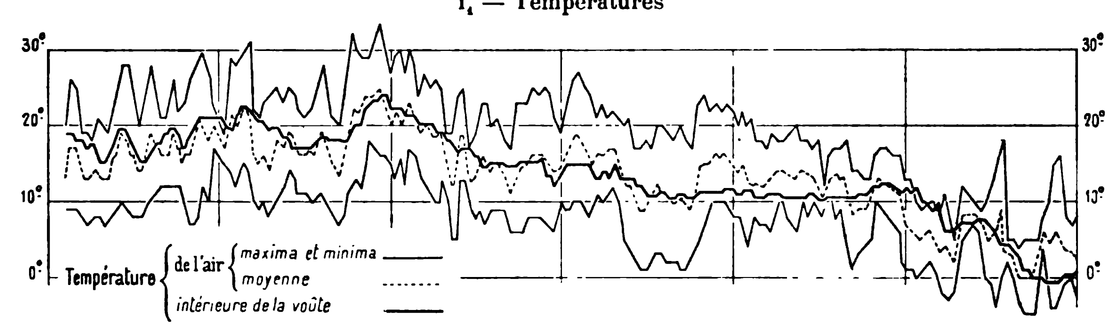
Si on trace deux courbes ayant pour abscisses les jours, pour ordonnées : l'une, le mouvement des clefs, l'autre, la température, elles se suivent assez exactement.

Je les ai données pour les ponts de Walnut Lane[9]. Plauen[10], Morbegno[11], Elise[12]. Les voici pour deux autres ouvrages :

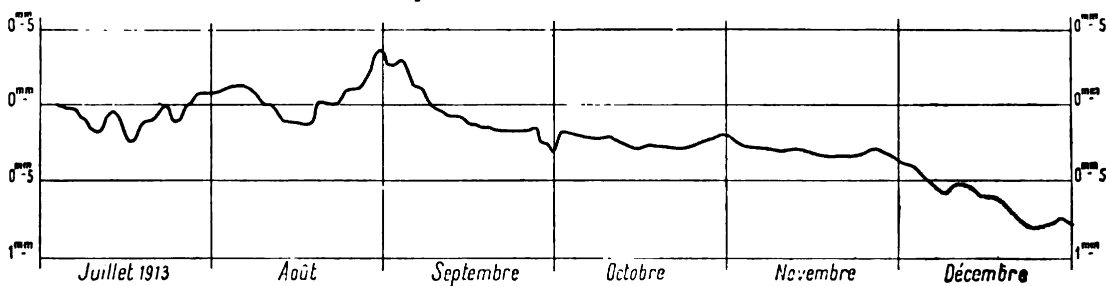


Pont de Saint-Loup[13] (voûte n° 1) — *Arc de 33ᵐ à 1/7.6*

f_1 — Températures

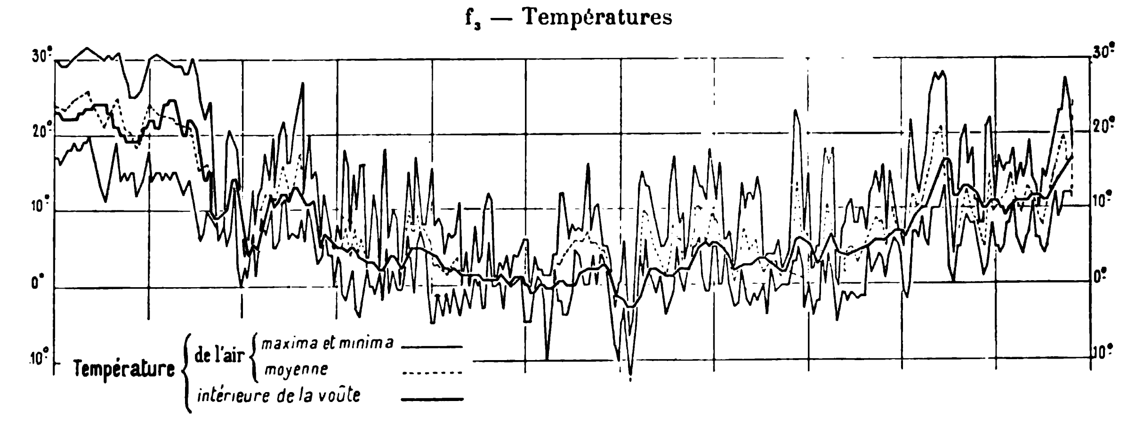


f_2 — Mouvements de la clef



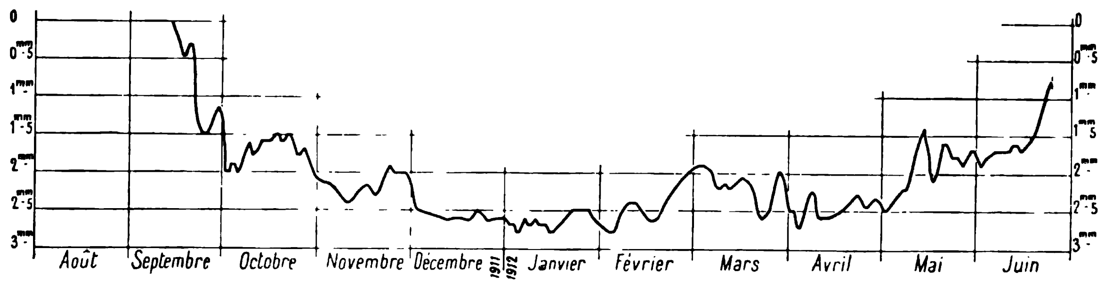
Viaduc de Morez[14] (voûte n° 1, côté Morez) — *Plein cintre de 20ᵐ*

f_3 — Températures





f_4 — Mouvements de la clef



9. — II, p. 93. 10. — III, p. 57. 11. — IV. p. 73. 12. — IV, p. 153.

13. — Sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat).

14. — Ligne de Morez à Saint-Claude.

§ 4. — *FISSURES D'HIVER*

Art. 1. — Effet du froid. — Le froid contracte les voûtes, en diminue la longueur, abaisse la clef de S en S' (f_s); AS se contracte, AOS tourne autour d'un point O voisin des retombées. Il y a fissure ou tendance à fissure le long de OA.

En été, la clef de la voûte monte, le tympan est soulevé par la voûte et, de plus, se dilate. Il y a compression le long de OA.

Art. 2. — Ouverture de joints aux reins des voûtes. — Pour les arcs tendus, le centre de rotation O est dans les joints même de retombée : ils s'ouvrent en hiver[15, 16].

Art. 3. — Fentes des tympans. — Le tympan se contracte par le froid et, de plus, suit la voûte qui s'abaisse : de là les fissures constatées :

dans les tympans pleins[17, 18, 19], spécialement le long de contreforts de piles[20], de murs en retour de culées[21] ;

dans les voûtes longitudinales d'élégissement : elles se coupent en un ou plusieurs points, mais normalement à leur axe[22, 23] ;

aux clefs des dernières voûtes transversales d'élégissement [21, 24] (point de moindre résistance), quelquefois le long de leur extrados[21].

15. — Pont sur l'Yonne, à Montereau (Ligne de Flamboin à Montereau), arcs de 24^m à 1/7,4 ; pont de Saint-Loup, sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat), arcs de 33^m à 1/7,5.

16. — Observations faites, sur ma demande, par M. Rétraint, Conducteur principal des Ponts et Chaussées.

	Pont d'Austerlitz				Pont des Invalides			
	Amont		Aval		Amont		Aval	
	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.	R.D.	R.G.
Hiver, 3°	$1^{mm}5$	$7^{mm}8$	$2^{mm}3$	$3^{mm}9$	$0^{mm}9$	$1^{mm}2$	$1^{mm}5$	$1^{mm}3$
Eté 20°	fissures refermées							
Eté 26°7					fissures refermées			

17. — Boucicaut, III, p. 260. – Pont du Brézou ; arche de 29^m20 à 1/4, ligne de Limoges à Brive par Uzerche. (Annales des Ponts et Chaussées, 1892, 1er semestre, p. 545 à 596, Pl. 6 : « *Notice sur la construction du viaduc du Gour-Noir* », M. Draux.)

Pont d'Austerlitz et Petit Pont, à Paris. — Viaducs en plein cintre de : Pierre-Buffière (Limoges à Brive par Uzerche); de Pompadour, de la Sagne, de Vignols (Limoges à Brive par Pompadour); d'Albi (Castelnaudary à Carmaux); d'Auray (Savenay à Landerneau); de Mussy (Paray-le-Monial à Givors); de Saint-Sulpice (Montauban à Castres).

18. — Dans les ponts en arc, elles partent de l'extrados des retombées.

19. — Elles peuvent être dangereuses pour les ponts-canaux ; il n'y faut point de grandes arches plates.

20. — Viaduc de Pierre-Buffière (Limoges à Brive). 21. — Castelet, II, 130.

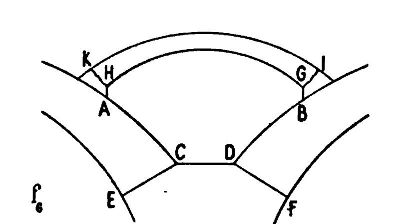
22. — Pont des Invalides (arcs : ouverture, 32^m ; montée : 3^m10 pour les arches de rive, 4^m10 pour les arches intermédiaires), « les galeries longitudinales se disloquaient au droit des naissances et menaçaient de s'écrouler ; on a dû les renforcer par un arceau inférieur en maçonnerie de briques doublant l'épaisseur de la voûte d'élégissement ».

M. Résal : « *Emplacements, Débouchés, Fondations, Ponts en maçonnerie* », Paris, Baudry, 1896, p. 266.

23. — On y a vu une supériorité des voûtes longitudinales sur les transversales.

24. — Gour-Noir (III, p. 108). — Constantine (II, p. 107, S_3, p. 509).

Art. 4. — Voûte unique d'élégissement jetée entre deux grandes voûtes[25]. — En hiver, B et A (f_6) des grandes voûtes tournent autour d'un point de DF et CE; la distance AB augmente. Pendant ce temps, la petite voûte se contracte : GH tend à diminuer. Donc, tendance à fissure le long de GI, de HK.



Voici ce qu'on a observé aux ellipses d'élégissement du pont des Amidonniers :

Avant la pose, — qui a un peu tardé, — de la dalle en béton armé, on y a vu des fissures de 1^{mm} au plus d'épaisseur[26] :

en hiver : à l'intrados, à la clef; à l'extrados, aux reins;

en été, par les fortes chaleurs : à l'extrados, à la clef; à l'intrados, aux reins.

Les arêtes des joints ouverts sont demeurées intactes. Les voûtes se sont articulées.

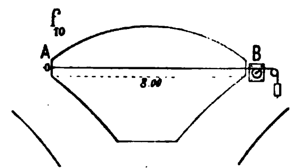
Mais la dalle a chargé lourdement les voûtes; elle les a abritées du soleil : leur température et celle des grandes voûtes ne varient plus guère que de 5 à 6° dans la journée, au lieu de 24. On n'y a plus vu de fissures.

C'est pour l'aspect qu'on a adopté des ellipses plates au lieu de pleins cintres, de courbes surhaussées, qui souffrent moins d'un petit changement de portée.

Au viaduc de Morez (ligne de Morez à Saint-Claude), voûtes d'élégissement de 8^m entre des pleins cintres de 20^m, on a, pour un abaissement de température des grandes voûtes de 18° (22° le 9 septembre 1911, 4° le 7 octobre 1911), mesuré[27] un écartement des pieds-droits de $0^{mm}34$.

Quand l'aspect ne les impose pas, ces grandes voûtes d'élégissement ne sont pas à conseiller.

Art. 5. — Fentes des plinthes et des parapets. — Il y en a en prolongement des fentes des tympans[28, 29], et ailleurs[30].



25. — Amidonniers (I, p. 193); Fontpédrouse (V, p. 87).

26. — IV, p. 281, renvoi 34.

27. — On a mesuré la variation de AB (f_{10}), au moyen d'un fil d'invar tendu entre A et B. En B était une crémaillère s'engrenant sur un pignon denté fixé à la maçonnerie. Les mouvements du pignon étaient amplifiés sur un cadran.

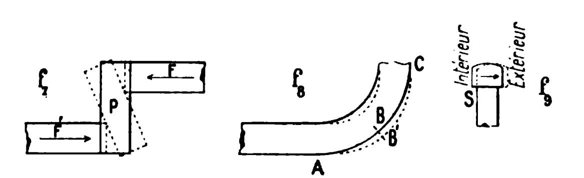
28. — Viaduc de La Pradelle, 1898-1900 (Ligne de Quillan à Rivesaltes), 12 arches en plein cintre de 12^m, en courbe de 300^m : fissures dans les tympans et le parapet, au droit des piles :

			Janvier		Février		Juillet	Décembre
Dates — 1902			28	31	6	17		5
Température			+15°	−2°	+12°	−4°	+25°	−5°
Epaisseur en *mm* des fissures au-dessus des piles n° :	6 (côté concave)	Tympan	$0^{mm}5$	$0^{mm}9$	$0^{mm}7$	$0^{mm}9$	$0^{mm}2$	$1^{mm}5$
		Bahut	*0. 4*	*1. 2*	*0. 7*	*1. 3*	*0*	*1. 8*
	7 (côté convexe)	Tympan	0. 2	0. 6	0. 3	0. 8	0. 1	1. 4
		Bahut	*0. 8*	*2*	*1. 3*	*2. 4*	*0. 08*	*2. 7* maximum

29. — Pont sur l'Armançon (3 arches en ellipse de 25^m à 1/4) : fissures partant de l'extrados et traversant les tympans. Fissures dans les plinthes de 2^{mm}, à 5°.

30. — Viaduc de Bramefond (Ligne de Saint-Denis au Buisson), parapet en pierre tendre de Chancelade, scellé à la plinthe tous les 0^m50 environ, exécuté en juillet et août : fissures à peu près tous les 20^m.
Annales des Ponts et Chaussées, avril 1892 : « *Notice sur la construction du viadnc du Gour-Noir* », par M. Draux, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, p. 583.

Ces fissures, on ne peut pas les empêcher. On ne peut que les dissimuler pour un temps (par exemple par un coulis de ciment) : elles reparaissent à chaque hiver.



Aux angles du couronnement (refuges au-dessus des piles, ressaut des murs des culées), la pierre P (f_7) pivote en été sous les poussées FF' des bahuts dilatés [31, 32].

L'hiver suivant, ils se contractent : la fissure restée ouverte se remplit de poussières : l'été d'après, la rotation de P s'accentuera [33].

Dans des parapets en courbe, le bahut ABC (f_8), plus dilaté que le fût S (f_9), a été déplacé en AB'C (f_8) [34].

§. 3 — *DISPOSITIFS PERMETTANT LA DILATATION JOINTS DE DILATATION*

Art. 1. — Voûtes inarticulées et voûtes articulées. — Dans les voûtes articulées, les mouvements ne sont pas contrariés, et doivent être plus grands : aussi y a-t-on toujours ménagé le jeu de la dilatation.

Dans les voûtes inarticulées, on ne paraît s'en préoccuper que depuis quelque quinze ans [35].

Art. 2. — Les murs des tympans sont pleins. — On les coupe verticalement au-dessus des retombées [36, 37] en dissimulant, si possible, la coupure derrière un pilastre sur une pile, derrière le mur en retour d'une culée [38].

31. — Viaduc de Brabant (Ligne de Briey-Villerupt), parapet en briques, niches en pierre de taille sur les culées et les piles-culées, reliées à la plinthe par des goujons de fer scellés, construit dans l'hiver 1905-06 : aux premières chaleurs du printemps, des pierres des niches se sont séparées et quelquefois rompues ; déplacement maximum 8^{mm} ; le mortier des joints des couronnements des parapets a été remplacé, de distance en distance, par des feuilles de caoutchouc.

32. — Viaduc d'Anderny, parapets et niches établis à température moyenne : en hiver, nombreux joints ouverts.

33. — Pont de Tarbes sur l'Adour (3 arches de $18^{m}30$, surbaissées au 1/7), 1877-1880 : mouvements dans les angles des bahuts des parapets ; fissures de 4^{cm} au cours de l'été, très chaud, de 1906.

34. — Pont de Tarbes. La saillie intérieure *s* (f_9) de $0^{m}02$ a disparu : la saillie extérieure *s'* a atteint 4^{c}.

Les voûtes inscrites en *italiques* aux renvois 35 à 47 sont articulées.

35. — 1899-1900 : Gutach (III, 122) ; Schwändeholzdobel (III, 126).

36. — Plauen (III, 53), à $32^{m}50$ de part et d'autre de la clef, retombée d'un cerveau de 65^{m} sur des culées en surplomb ; Ziegenhals (III, 208) ; Schwusen (III, 213) ; *Coulouvrenière* (IV, 81) ; *Garching* (IV, 95) ; *Kempten* (IV, 119) ; *Elise* (IV, 151) ; *Hochberg* (IV, 177) ; *Mannheim* (IV, 206).

37. — Au mur de garde du réservoir des Settons, on a, devant les joints de dilatation ménagés, disposé des lames de cuivre de 2^{mm}, ployées en leur milieu, boulonnées par leurs bords sur la maçonnerie.
Annales des Ponts et Chaussées, IV, juillet-août 1911, p. 204 : « *Note sur les joints de dilatation du mur de garde des Settons* », par M. P. Breuillé, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.
Dans des murs de soutènement en béton, à Chicago, de 1.875^{m} de long, on a ménagé des joints de dilatation fermés par du feutre.
Engineering Record, 27 janvier 1906.

38. — *Munderkingen* (IV, 57) ; *Malling* (IV, 175) ; *Cornélius* (IV, 180) ; *Reichenbach* (IV, 183) ; *Wittelsbach* (IV, 199).



Art. 3. — Les murs des tympans sont évidés par des voûtes. — La coupure verticale des tympans est alors :

soit entre la dernière demi-pile du viaduc d'élégissement et la pile ou la culée de la grande voûte [39];

soit au-dessus de la retombée extrême [40] ou de la naissance extrême [41] de la dernière voûte d'évidement;

soit au-dessus de la clef de cette voûte [42];

soit à la fois au-dessus de sa clef et de ses retombées, parce qu'alors on l'a articulée en ces trois points [43].

On arme parfois :

soit l'ensemble des voûtes d'élégissement [44];

soit la dernière voûte seulement [45].

Art. 4. — La chaussée est portée par une plate-forme en béton armé sur murs ou colonnes en béton armé. — On coupe cette plate-forme :

soit seulement au-dessus des retombées [46];

soit, en outre, en d'autres points [47].

39. — Schalchgraben (II, 168); Rothweinbach (II, 172); Krenngraben (III, 135); Michelau (III, 209); Mehring (III, 253); Orléans (le premier grand ouvrage français où l'on ait assuré le jeu de la dilatation) (III, 258); Schweich (III, 268); *Göhren* (IV, 141); *Illerbeuren* (IV, 161); *Neckargartach* (IV, 186); *Moulins* (IV, 202).

40. — Palmgraben (II, 164); Gutach (III, 122); Steyrling (III, 137); Salcano (III, 148); Langenbrand (III, 152); *Maximilien* (IV, 192); *Max-Joseph* (IV, 242).

Aux ponts de Walnut Lane (II, 86) et de la Rocky River (II, 98), où les voûtes d'évidement sont en béton armé, il y a, aux retombées des voûtes d'élégissement, un joint de dilatation par voûte au premier pont, par deux voûtes au deuxième.

41. — Big Muddy River (I, 227); *Grasdorf* (IV, 131); *Inzigkofen* (IV, 227); *Neckarhausen* (IV, 235).

Au viaduc de la Sitter (Ligne du lac de Zurich au lac de Constance), le joint des tympans a été rempli de goudron; à Krenngraben (III, 134), à Steyrling (III, 137), à Salcano (III, 143) de feutre asphalté; à Rothweinbach (II, 171), d'asbeste.

42. — Schwändeholzdobel (III, p. 126).

43. — *Morbegno* (IV, p. 68).

44. — Connecticut (I, p. 69), il y a des joints de dilatation aux clefs des voûtes d'élégissement, de deux en deux; Orléans (III, p. 258); *Illerbeuren* (IV, p. 161).

45. — *Grasdorf* (IV, p. 131); *Inzigkofen* (IV, p. 227); *Neckarhausen* (IV, p. 235).

46. — Guggersbach (III, p. 59); Longuich (III, p. 280); *Wallstrasse* (IV, p. 145).

47. — Edmondson (I, p. 124); Seythenex (III, p. 178); *Gräveneck* (IV, p. 215).

Au pont des Amidonniers (I, 199), la dalle en béton armé, non coupée, est posée sur des balanciers en béton armé.

LIVRE III

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS ?

GRANDES VOÛTES

CLASSEMENT PAR PAYS

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

PROGRÈS

PART DE LA FRANCE

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS ?

CHAPITRE I

QUELQUES GÉNÉRALITÉS

§ 1. — *PIERRE ET MÉTAL*

Le métal de nos ponts est un produit industriel; la nature ne nous le donne pas : on ne l'y rencontre qu'oxydé.

Abandonné à lui-même, il retourne à l'état d'oxyde : il faut, continûment, l'en empêcher.

La pierre, nous l'employons telle que nous la trouvons. On en peut choisir qui ne craint pas les intempéries. Sa résistance aux efforts ne diminue pas avec le temps[1] : la pierre des Pyramides résiste, aujourd'hui, comme il y a 50 siècles.

Le liant des mortiers est, lui, un produit industriel; mais le temps, qui rouille le métal, qui desserre les rivets, durcit le mortier.

Puisque l'acier est un produit fabriqué, il peut être amélioré; la pierre, non.

Le métal travaille à tous les genres d'efforts : on l'emploie depuis peu ; chaque jour on lui prête des formes nouvelles.

Les voûtes ne travaillent qu'à la compression : on en fait depuis plus de 2.000 ans; tout n'est pas trouvé, mais il y a moins à trouver.

§ 2. — *CAS OÙ S'IMPOSE LE MÉTAL*

Le pont en métal est mince, léger, se plie à toutes formes.

Il s'impose :

quand on n'a pas assez de revanche au-dessus des crues, des hautes eaux navigables, de la voie traversée;

pour les ponts de ville entre quais, quand le débouché superficiel manque, même en exagérant le dos d'âne ou les rampes d'accès; ou qu'il faut diminuer le remous et ne gêner ni la navigation, ni les crues, ni les courants de marée, ni la circulation sur les bas ports ;

quand le sol de fondation est mauvais, ou seulement douteux, que les appuis peuvent s'enfoncer ou reculer;

quand il faudrait par trop dépasser ce qui a été fait :

comme portée[2], ou à la fois comme portée et surbaissement[2];

1. — La maçonnerie de briques s'améliore en vieillissant. Vitruve fait remarquer que, pour estimer la valeur d'un mur en moellons, on déduit du prix d'exécution 1/80e par an : « *De latericiis vero, dummodo ad perpendiculum sint stantes, nihil deducitur; sed, quanti fuerint olim facti, tanti esse semper æstimantur* » (Livre II, chapitre VIII).

2. — Voir plus loin, Titres II, III, IV.

comme hauteur, — ou à la fois comme hauteur et portée[3];

pour les ouvrages à travées très inégales, à plan compliqué, irrégulier;

pour les très biais;

quand il faut opérer vite ;

quand il n'y a pas de bons matériaux ou de bons ouvriers (colonies inhabitées....)

CHAPITRE II

COÛT TRÈS VARIABLE DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

DES PONTS MÉTALLIQUES COMME DES PONTS VOÛTÉS

Quand les deux solutions sont possibles, laquelle est la moins chère?

A une question aussi générale, il n'y a pas de réponse.

Le coût dépend d'un grand nombre d'éléments très variables : prix des matériaux qui change avec les lieux, avec le temps[4], — sol, profondeur, difficulté de fondation, — type d'ouvrage, sa largeur, sa longueur, — portée des arches ou travées, — aspect, — décoration, etc., etc....

3.

	Ligne	Date	Hauteur H	Ouverture de la plus grande arche $2a$	Somme $H+2a$	Sources
Aqued[t] de Roquefavour		1841-47	82ᵐ65	16ᵐ	98ᵐ65	Morandière, « *Construction des Ponts* », p. 390.
Viaducs de Gœltzschthal	Leipzig-Hof	1846-51	80.34	30.875	111.215	Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1853, p. 241. *Chemins de fer saxons.* M. de Villiers.
Viaducs de Elsterthal	Leipzig-Hof	1846-51	69.68	30.59	100.27	Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1853, p. 241. *Chemins de fer saxons.* M. de Villiers.
Viaducs de l'Altier	Brioude-Alais	1867-69	73.33	16	89.33	Exposition, Paris, 1878, Notice Travaux publics, p. 352
Viaducs de la Crueize	Marvejols-Neussargues	1879-83	63.30	25	88.30	Ecole des Ponts et Chaussées. Dessins distribués aux Elèves, T. III, 4[e] fascicule, p. 485.
Viaducs de Mussy	La Clayette-Lamure (*Paray-le-Monial-Givors*)	1892-95	60	25	85	Annales des Ponts et Chaussées, 1901, I, p. 235. *Viaduc de Mussy.* M. Pouthier.
Viaducs de Weissenbach	Saint-Gall-Wattwil	1907-09	61.40	25	87.70	Denkschrift über die Eisenbahnverbindung Romanshorn-S[t] Gallen-Wattwil-Uznach. Pl. 8.

Dans son *Cours de Chemins de fer*, 1868-69, p. 360, 361, Pl. 19, Bazaine décrit un aqueduc à Spolète, sans doute d'après Gauthey; l'ouvrage existant a 76ᵐ85 de hauteur au lieu de 131ᵐ, des arches en ogive de 5 à 9ᵐ et non de 21ᵐ, a beaucoup plus de pleins que de vides et présente l'aspect lourd et massif d'un mur à arcades, au lieu de l'effrayante légèreté du dessin de Gauthey. Enfin, il n'a pas été construit en 741 par Théodoric, lequel est mort en 526, mais par la commune de Spolète, entre 1239 et 1278. Lire à ce sujet une très intéressante brochure de M. Clericetti, professeur à l'Ecole des Ingénieurs de Milan (Milan, 1884).

4. — Ponts en acier construits par la C[ie] P.-L.-M depuis 1886 : 23.599 tonnes; prix moyen annuel du kilog : 38ᶜ25 (1896) — 50ᶜ70 (1900) — 32ᶜ15 (1904) — 52ᶜ97 (1908) — 55ᶜ58 (1913); minimum, 31ᶜ30 (1904); maximum, 59ᶜ50 (1909).

Si, pour un grand nombre de ponts métalliques ou de ponts voûtés, on relève le prix p du m.q. de surface offerte à la circulation, on trouve pour les deux des écarts énormes [5,6].

Des moyennes ne signifient rien, c'est affaire d'espèce. Il faut, dans chaque cas, comparer le moins cher des ponts en métal au moins cher des ponts voûtés, l'un et l'autre évalués sans parti pris.

5. — **Ponts en maçonnerie.** — A 26 ponts vicinaux de l'Ardèche, construits avec la plus stricte économie, — fondations faciles, matériaux à pied-d'œuvre, — p a varié de 34f à 265f, moyenne 105f50.

Pour de grands ponts à fondations faciles, il faut déjà doubler :

Ponts de Bléré, sur le Cher (1898-99), 208f ; des Andelys (1872-73), 222f.

Si les fondations sont chères, le prix s'élève : Pont de Mareuil, sur la Dordogne (1891), ligne de Cahors à Brive, 348f ; ponts sur la Garonne (chemin de fer à une voie) : Belleperche (1895-1900), 312f ; Port-Sainte-Marie (1874-77), 612f ; Marmande (1881-85), 695f.

Voici, classés d'après leur prix, 71 ponts à voûtes de 40m et plus, construits depuis 1875 ;

p	Voûtes inarticulées				Voûtes articulées (*Tome IV*)	
		Nombre de ponts	*Ponts en 2 anneaux* Voir Tome V, p. 71	Nombre de ponts		Nombre de ponts
moins de 200f	Huzenbach, 1889, III, p. 193 ; Longuich, 1909-10, III, 237 ; Schweich, 1905-06, III, 235 ; Michelau, 1905-06, III, 195 ; Guggersbach, 1906. III, 15 ; Mehring, 1903-04, III, 231 ; Lichtensteig, 1907-09, III, 89 ; Brent. 1899-1900, I, 13 ; Solis, 1901-02, I, 53 ; Teinach, 1882, III, 193.	10			Baiersbronn, 1889, p. 39 ; Marbach, 1886-87, 39 ; Munderkingen, 1893, 53 ; Neckargartach, 1903-05, 169 ; Inzigkofen, 1895, 221 ; Gôhren, 1903-04. 125 ; Grâveneck, 1911-12, 211.	7
de 200f à 300f	Trittenheim, 1907-08, III, 235 ; Verdun-s.-Doubs, 1895-97, I, 141 ; Bellefield, 1896-97, III, 15 ; Plauen, 1903-05, III, 15 ; Boucicaut, 1888-90, III, 231, Saulnier, 1882, III, 13 ; Cinuskel, 1910-12, II, 179 ; Wäldlitobel, 1883-84, II, 121 ; Seythenex, 1908-11, III, 171 ; Pouch, 1890, III, 83 ; Krummenau, 1910-11, III, 91.	11	Amidonniers, 1903-11, I, 189.	1	Wallstrasse, 1904-05, 125 ; Höfen, 1885, 39 ; Moulins-lez-Metz, 1904-05, 171 ; Illerbeuren, 1903-04, .157 ; Reichenbach, 1902-03, 169 ; Neckarhausen, 1899-1900, 222 ; Hochberg, 1901-03, 167 ; Grasdorf, 1899-1900, 125 ; Elise, 1906-07, 127 ; Cornelius, 1902-03, 167.	10
de 300f à 400f	Calcio, 1877-78, III, 81 ; Bellows-Falls, 1899, III, 223 ; Escot, 1907-09, II, 123 ; Freyssinet, 1890-91, III, 83 ; Gravona, 1884, II, 179 ; Ramounails, 1906-08, II, 179 ; Rebuzo, 1898-1900, I, 39 ; Avignon, 1905-09, III, 235 ; Gour-Noir, 1888-89, III, 81 ; Svenkerud, 1905-07, III, 87 ; Saint-Pierre, 1886, I, 91.	11			Wittelsbach, 1904-05, 171 ; Kempten, 1906, 113.	2
de 400f à 500f	Big Muddy River, 1901-03, I, 223 ; Langenbrand, 1907-09, III, 89 ; Canale, 1904-06, III, 183 ; Strandeelven, 1902-03, III, 85 ; Orléans, 1904-06, III, 233 ; Valence, 1901-05, I, 143.	6	Luxembourg, 1899-1903, II, 61.	1	Prince-Régent, 1900-01, 223 ; Maximilien, 1904-05, 169 ; Max-Joseph, 1901-02, 223 ; Garching, 1907-08, 93.	4
de 500f à 600f	Wheeling, 1891-92, III, 13 ; Schwändeholzdobel, 1899-1900, III, 85 ; Wiesen, 1907-09, I, 233 ; Montanges, 1908-09, III, 17 ; Schalchgraben, 1904-05, II, 121 ; Oloron, 1881-82, I, 39 ; Lusserat, 1908-10, III, 89 ; Antoinette, 1883-84, II, 117 ; Castelet, 1882-83, II, 117 ; Gutach, 1899-1900, III, 85 ; Palmgraben, 1904-05, II, 121.	11				
de 600f à 700f	Verdon, 1905-06, I, 129 ; Mantes, 1873-75, I, 141.	2	Walnut-Lane, 1906-08, II, 63. Sidi-Rached, 1908-12, II, 65.	2	Morbegno, 1902-03, 63.	1
de 700f à 800f	Washington, 1899-1900, I, 61 ; Empereur-François, 1898-1901, I, 141.	2				
de 800f à 900f	Céret, 1883-85, II, 121 ; Lavaur, 1882-84, II, 119.	2				
1.173f	Steyrling, 1904-05, III, 87.	1				
1.598f	Salcano, 1904-06, III, 87.	1				

6. — **Ponts en métal** (métal, maçonneries, fondations) :

Poutres droites sous chemin de fer (deux voies) : Cosne (Bourges à Cosne, 1892), 345f ; Melun, sur la Seine (Corbeil à Montereau, 1895), 466f ; Montereau, sur la Seine (Corbeil à Montereau, 1896), 562f ; Avignon (raccordement des deux lignes rive droite et rive gauche du Rhône, 1902), 602f ; Peseux, sur le Doubs (Saint-Jean-de-Losne à Lons-le-Saulnier, 1903), 635f ; Caronte (Miramas-L'Estaque, 1909), travées de 82m50, 1.298f.

Ponts de grande ville (grands arcs d'acier sous chaussée) : Ponts sur le Rhône, à Lyon : Université, 1903, 441f ; La Fayette, 1888-90, 623f ; Morand, 1888-90. 678f ; Pont Mirabeau, à Paris, 1893-95, 594f ; Pont de Rouen, 1884-88, 889f ; Pont Alexandre III, à Paris, 1897-1900, 1.120f.

SUPÉRIORITÉ DES PONTS EN MAÇONNERIE
AU POINT DE VUE DE L'ENTRETIEN PROPREMENT DIT

§ 1. — *ENTRETIEN DES PONTS MÉTALLIQUES*

Art. 1. — Entretien proprement dit. — On visite chaque année[7] les ponts métalliques ; on remplace les rivets desserrés, les bois fatigués du platelage. On les repeint pour les préserver de la rouille (une couche de peinture en moyenne tous les 5 ans). On vérifie, tous les 5 ans, leurs flèches permanentes[7].

Pour les ponts de chemins de fer, cet entretien est fait par les Services de Voie. Mais les Villes, les Départements et les Communes n'ont pas de service organisé et souvent peu de ressources : pour eux, c'est un motif spécial à ne pas faire de ponts métalliques.

Art. 2. — Influence du type de poutre sur le nombre de rivets à remplacer. — Des ponts légers, à petits éléments, à treillis mince, « ferraillent » au passage des trains.

On y a surtout à refaire les rivets qui attachent les longerons aux entretoises[8].

On n'a guère qu'à repeindre les ponts à poutre pleine[9], ceux à gros éléments[10], les très grands que le passage des trains impressionne peu[11], ceux qui sont très bien rivés[12].

Art. 3. — Causes spéciales de détérioration. — L'air salin au bord de la mer[13], les fumées des machines attaquent le métal[14].

7. — La circulaire du Ministre des Travaux publics n° 5 du 29 août 1891 impose :
une visite annuelle « *portant principalement sur l'état de la rivure* »;
une fois tous les 5 ans « *une inspection détaillée et une vérification des flèches permanentes* ».
La circulaire du Ministre de l'Intérieur du 21 mai 1892 prescrit ces visites et épreuves pour les ponts métalliques dépendant des chemins vicinaux.

8. — Depuis leur mise en service jusqu'en 1901, on a remplacé 263 % de ces rivets au viaduc de la Bouble.

N° Renvoi	Ponts :	Rivières traversées	Période	Soit pendant	Dépenses par an		Observations
					par tonne de métal	par m.q. de plan	
9	de Langon	Garonne	1892/VII-1911/VIII	19 ans	3f47	1f71	Garabit a coûté 3.345.000f. L'entretien annuel a été de 4.650f, soit à 4 °/o un capital de 116.000f ne représentant qu'un accroissement de 3,4 °/o des dépenses de construction.
9	de Moissac	Tarn	1893/I-1902/XII	10 ans	3.30	1.45	
10	de Bordeaux	Garonne	1893/III-1902/IX	9 1/2	1.80	1.17	
11	de Garabit	Truyère	1888-1902	14 ans	1.10	2.31	
11	du Viaur	Viaur	1903/I-1911/XII	9 ans	1.00	0.63	

12. — Pour les ouvrages bien faits, bien rivés, l'entretien est insignifiant. Ex. : ces 3 ponts à 2 voies, à poutres droites, en acier, à travées solidaires :

Pont de :	Ligne de :	Longueur du tablier	Période			Dépense			
			de	à	Durée	totale de la période	moyenne par an		
							pour l'ouvrage	p^r m.q. en plan	par tonne
Melun, sur la Seine	Corbeil-Montereau	145m	1897	1910	13 ans 8 mois	521f 72	40f 36	0f 035	0f 045
Avignon, sur le Rhône	Raccordement des lignes de rive droite et de rive gauche du Rhône	553	1905	1910	5 ans	5.940.36	1.188.07	0.26	0.30
Peseux, sur le Doubs	St-Jean-de-Losne-Lons-le-Saulnier	148.27	1905	1911	6 ans 5 mois	560	87.27	0.0074	0.10

13. — Genio Civile, septembre 1903.

14. — Aux passages supérieurs métalliques de la ligne de Paris à Auteuil, les parties inférieures des poutres rongées par la fumée, n'avaient plus de résistance; le moment d'inertie des poutres était réduit au 1/4 ou au 1/5 de sa valeur.
Revue Générale des Chemins de fer, 5 novembre 1901, M. Rabut : « *Conférence sur l'expérimentation des ponts* ».

Art. 4. — Capital à ajouter au coût de l'ouvrage pour tenir compte des frais d'entretien proprement dit. — Il serait fort intéressant, mais il est difficile, de faire la part de la dépense de consolidation due à l'augmentation des surcharges, et celle de l'entretien proprement dit.

J'essayerai seulement d'indiquer « l'ordre » des frais d'entretien :

	Est	Midi		Orléans		P.-L.-M.
Dates des relevés..	1902	1902	1912	1902	1912	1911
Ouvrages — Longueur............	767^{m}344	1.570^{m}21	3.635^{m}80	3.784^{m}40	6.859^{m}72	2.792^{m}58
Ouvrages — Poids................	2.525^{T}	6.875^{T}	12.142^{T}	16.519^{T}	22.301^{T}	12.023^{T}
Dépense moyenne d'entretien par an — pendant une période de	6 à 46 ans	2 à 35 ans	5 à 10 ans	7 à 23 ans	5 à 10 ans	5 à 51 ans
totale................	8.089^{f}44	14.700^{f}54	25.818^{f}99	33.917^{f}66	31.759^{f}00	16.008^{f}86
par m. q. en plan [15]...	1^{f}46	1^{f}21	1^{f}00	1^{f}56	0^{f}89	0^{f}84
par tonne...........	3^{f}20	2^{f}13	2^{f}12	2^{f}05	1^{f}42	1^{f}33
Correspondant à un capital d'entretien (à 4 %) — par m. q., de..	36^{f}50	30^{f}25	25^{f}00	39^{f}00	22^{f}25	21^{f}50
par tonne, de..	80^{f}00	53^{f}25	53^{f}00	51^{f}25	35^{f}50	33^{f}25
Rapport du capital d'entretien au coût du tablier métallique compté au prix moyen de 500^{f} la tonne..	16/100	10.6/100	10.6/100	10.2/100	7.1/100	6.7/100
En gros, dans les grands ponts à poutres droites, le métal représente souvent les 70 % de la dépense : pour eux, le rapport du capital d'entretien au prix total de construction s'abaisse à............	11/100	7.4/100	7.4/100	7.1/100	4.9/100	4.7/100

Pour des ouvrages bien conçus, le capital représentant l'entretien proprement dit est probablement inférieur à 10 % des dépenses totales de construction.

§ 2. — *ENTRETIEN DES PONTS VOÛTÉS*

Art. 1. — Entretien proprement dit. — Aux ponts en maçonnerie, on a eu à refaire des joints (ce qui peut se faire sans gêner la circulation), à remplacer des pierres gelées, pourries ; surtout, — c'est souvent la grosse dépense, — à refaire en asphalte d'anciennes chapes en ciment ou en béton [16].

15. — M. de Boulongne, Ingénieur en chef de la Voie de la Cie P.-L.-M., évalue l'entretien normal par m. q. et par an, de 0^{f}45 à 0^{f}80 pour les ouvrages avec platelage métallique, soit, en capital à 4 %, de 11^{f}25 à 20^{f}. Pour des ouvrages coûtant 500^{f} le m. q., ce n'est que 2,5 % à 4 % des dépenses de construction.

16. — Dépenses d'entretien d'ouvrages en maçonnerie sous rails :

	Est	Etat	Midi		Orléans				P.-L.-M.	
Relevés faits en	1902	1902	1912		1902		1912		1912	
	2 voies	1 voie	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies	1 voie	2 voies
Nombre d'ouvrages..............	31	13	23	16	47	39	69	77	11	22
Nombre d'arches................	161	39	57	26	329	426	373	620	139	333
Longueur............................	3.615^{m}	785^{m}	1.281^{m}	371^{m}	7.343^{m}	7.231^{m}	3.313^{m}	10.411^{m}	2.023^{m}	3.936^{m}
Cube de maçonnerie (m.c.),........	183.582	29.731	51.231	14.355	323.873	400.895	388.194	677.900	72.371	167.402
Dépense moyenne d'entretien par an — pendant une période de	5 à 18 ans	9 à 21	5 à 47	9 à 47	4 à 43	6 à 43	5 à 10 ans		10 à 40	11 à 62
totale................	15.375^{f}15	88^{f}81	863^{f}05	391^{f}23	7.026^{f}29	9.231^{f}52	5.838^{f}32	3.930^{f}05	6.959^{f}40	6.200^{f}56
par m.c. de maçonnerie	0^{f}083	0^{f}0029	0^{f}017	0^{f}027	0^{f}021	0^{f}023	0^{f}015	0^{f}006	0^{f}096	0^{f}037
par m.q. en élévation	0^{f}32	0^{f}0069	0^{f}051	0^{f}093	0^{f}049	0^{f}09	0^{f}044	0^{f}02	0^{f}186	0^{f}137
par m.q. en plan....	0^{f}15	0^{f}017	0^{f}097	0^{f}132	0^{f}18	0^{f}14	0^{f}14	0^{f}01	0^{f}667	0^{f}191

A la plupart des ouvrages, qui ont aujourd'hui plus de 40 ans, la chape était mauvaise : l'eau a traversé les maçonneries, dissous et entraîné la chaux du mortier, attaqué les matériaux sensibles à l'humidité (briques mal cuites, grès poreux, certains tufs,....). Après n'avoir rien coûté pendant longtemps, des ponts en maçonnerie ont tout à coup demandé une grosse réparation, qui a été de refaire entièrement[17] la chape, — réfection qui, en cours d'exploitation, a coûté jusqu'à 5 et 6 fois le prix d'une chape neuve.

Sur les ouvrages bien faits, il n'y a à peu près rien à dépenser.

En 10 ans, on a dépensé 707^f pour entretenir 7 grands ouvrages construits par Morandière et son élève M. Dupuy, ouvrages qui ont coûté 6.754.398^f et cubent 105.853^{mc}[18].

Au pont de Montlouis, de 1844, long de 378^m, on a, en 10 ans, dépensé 6^f — un sou par mois.

CHAPITRE IV

SUPÉRIORITÉ DES PONTS VOÛTÉS

POUR RÉSISTER A DES MACHINES PLUS LOURDES

§ 1. — *IL FAUT CONSOLIDER OU REFAIRE LES PONTS MÉTALLIQUES*

La grosse dépense des ponts métalliques de chemin de fer, ce n'est pas l'entretien proprement dit des tabliers ne supportant que les surcharges pour lesquelles ils ont été calculés, — c'est que, s'ils doivent laisser passer des machines plus lourdes, il faut les consolider, souvent les remplacer.

17. — On réussit mal à ne refaire qu'une partie de la chape : il n'en coûte guère plus de la refaire toute.

18.

	Dates d'exécution	Longueur	Hauteur	Arches — Nombre	Arches — Portée	Cube de maçonnerie	Dépenses de construction	Dépenses d'entretien — pendant	d'entretien — totale	par an — totale	par an — par m. q. en plan	par an — par m.c. de maçonnerie
									(en francs)		(en millimes)	
Pont de Montlouis, sur la Loire. *(Orléans à Tours)*	1843-44	378^{m}60	11^{m}30	12	24^{m}75	19.598^{mc}	1.620.398^f	10 ans 1892-1902	6^f	0^{f}60	0^{mm}2	0^{mm}03
Viaduc de Pompadour........... *(Nexon à Brive)*	1873-75	285	55	8	25	18.420	1.200.000	12 ans 1888-1900	59.30	4.94	4	0.2
Ensemble, les 4 ponts de Mauzac, Trémolat, Alles, Limeuil ...... *(Bergerac au Buisson)*	1876-78	890.34	12.10 14.40	7 21	30 24	24.464	1.721.000	10 ans 1893-1903	535.37	53.54	7.5	2.2
Viaduc du Blanc, sur la Creuse. *(Poitiers au Blanc)*	1883-86	528	38.11	21	20	43.371	2.213.000	10 ans 1892-1902	106.48	10.65	4	0.2
Totaux et moyennes...		2.081^{m}91		69	20 à 30^m	105.853^{mc}	6.754.398^f		707^{f}15	69^{f}73	5.1	0.66



Or, le poids des essieux augmente continûment et très vite [19]; il faut donc, continûment, soit consolider les ponts métalliques si on le peut [20, 21], soit les refaire [22], et souvent après peu d'années.

On fait travailler l'acier, sous les trains actuels, au 1/4 de sa rupture : si on calculait les tabliers pour les plus lourdes machines de l'avenir, il y faudrait beaucoup plus d'acier, et ils seraient tout de suite bien plus chers que les ponts voûtés.

Pour les ponts sous chaussée [23] et sous voie étroite, les surcharges ont peu augmenté.

§ 2. — *LES PONTS EN MAÇONNERIE RÉSISTENT*

Quelques petits ouvrages, — surtout de petits arcs surbaissés, — ont été disloqués parce que le matelas de remblai et de ballast était trop mince.

On a quelquefois refait des murs de tympans ébranlés par les nouvelles machines plus lourdes.

Mais les grands ouvrages en maçonnerie ont pu porter sans fatigue les lourdes et vites « Pacific » ; leur capacité de résistance n'était pas épuisée.

Le pont en maçonnerie travaille surtout au poids mort ; il a de la masse : « *mole suâ stat* ». Les surcharges ne l'impressionnent pas ; on peut impunément les augmenter : elles demeurent fort au-dessous de celles qu'il peut porter.

19. — Augmentation du poids des machines et de leurs tenders :

	Dates des circulaires, normes, etc.	Essieux des machines					Machines avec leurs tenders							Sources
		Nombre	Pour le plus lourd						Augmentation de poids				
			Poids	Augmentation totale	Augmentation °/°	Poids total	Longueur	Poids de la machine par m. c¹	totale	pour un nombre d'années de :	par an totale	par an °/°	
France (Cie P.-L.-M.)	1891	4	14^{T}	4^{T}5	32	80^{T}	15^{m}30	5.229^{k}	1.502^{k}	10 ans	150^{k}	2.9	Circulaire ministérielle du 29 août 1891.
	1911	6	18.5			157.3	23.37	6.731					Machine « Pacific ».
Amérique (Missouri-Pacific)	1888	5	12.138	12.81	105.5	84	17.605	4.771	3.907	20 ans	195	4.1	Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer. — Berne 1910. N° 4. M. Byers, Ingénieur en chef du « Missouri-Pacific Ry ».
	1908	5	24.948			180.1	20.753	8.678					
Russie	1896	4 de	15	5	33.3	97.5	16.10	6.056	2.858	11 ans	260	4.3	N° 45, p. 447 à 450. M. Bélébusky.
	1907	5 de	20			156	17.50	8.914					
Italie	1897	4	15	2	13.3	90	15.65	5.750	1.466	12 ans	122	2.1	N° 22, p. 198.
	1909	5	17			127	17.60	7.216					

20. — De 1892 à 1909, les Chemins de fer de l'Etat hongrois ont renforcé des ponts métalliques d'une longueur totale de 16.730^{m} ; parmi les plus importants, 26 ouvrages comportant 80 travées de 26^{m} à 53^{m}298, d'une longueur totale de 3.797^{m}05, construits de 1863 à 1898, renforcés de 1897 à 1909. (Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer, Berne 1910, 1er fascicule, volume XXIV, n° 6, p. 2063 à 2136, — M. Maurer, Inspecteur principal des Chemins de fer de l'Etat autrichien.)

21. — Le viaduc du Credo, sur le Rhône (ligne de Bellegarde à Saint-Gingolph), construit en 1878, a été renforcé en 1912-13 (dépense : 152.300^{f}). Le pont de Saint-Germain-des-Fossés, sur l'Allier (ligne de Saint-Germain-des-Fossés à Clermont), construit en 1858, a été renforcé en 1912 (dépense : 357.100^{f}).

22. — Viaduc de la Vézeronce (ligne de Lyon à Genève), construit en 1855-58, reconstruit en 1912-13 (dépense : 315.000^{f}).

23. — Les deux circulaires des 15 juin 1869 et 29 août 1891 prévoient les mêmes surcharges : véhicules de 11^{T} à 2 roues, de 16^{T} à 4 roues, — surcharges de 400^{k} par m.q. sur les trottoirs.



CHAPITRE V

AVANTAGES SPÉCIAUX DES PONTS VOÛTÉS

§ 1. — *ILS SONT PLUS BEAUX*

Les poutres droites, les poutres à semelle supérieure courbe, en poisson, en ventre de poisson, — les croissants de lune de Porto, de Garabit, — les ponts où l'on a réalisé, en métal la courbe des moments de flexion (quelques-uns de ceux-là sont hideux), — tout cela ne sert qu'à passer l'eau : l'aspect n'en importe pas plus que d'un pont de service ou d'un bac.

On a beau décorer un pont métallique, ce n'est qu'un outil, un instrument, un échafaudage : c'est grêle, c'est menu, cela sent le provisoire.

Un grand pont métallique peut être une solution élégante, un beau travail d'Ingénieur, étonner par sa portée, sa hauteur, son surbaissement, par la difficulté vaincue. S'étonner n'est pas admirer.

Ce qu'il y a encore de mieux dans les beaux ponts métalliques, c'est leur maçonnerie, et si l'on accepte les grands arcs de fonte ou d'acier, c'est qu'ils commencent à ressembler à des voûtes [24].

Le pont en maçonnerie, lui, peut être plus qu'utile : il peut valoir, non seulement par son objet, mais par lui-même, ses lignes, ses formes; être beau, bien que petit; — être grand sans être énorme.

La décoration y peut faire partie de l'ouvrage, n'y pas être rapportée, plaquée.

Il peut s'ajuster aux lieux; — n'y point sembler étranger, importé. On peut jeter sur une gorge sauvage [25] un arc à pierres grossières, qui en fasse comme partie : on peut faire à Toulouse un pont toulousain.

§ 2. — *ILS SONT PLUS SOLIDES*

Jamais un pont voûté n'a été écrasé sous un train [26], crevé par un train déraillé [27], renversé par le vent [28].

Ils résistent aux chocs des bateaux, des arbres emportés par une crue, ils ne sont pas rongés par la fumée des trains ou des bateaux.

§ 3. — *ILS DURENT*

La passerelle en fonte des Arts a 112 ans; le pont suspendu sur le détroit de Menai, 89 ans.

24. — On les fera pleins. — Ceux du pont de l'Université, à Lyon, sont à jours, il est permis de le regretter.

25. — Il est quelquefois demandé — non sans raison — par les Syndicats de défense des paysages.

26. — 14 juin 1891. Pont de Mœnchenstein, près de Bâle. Travée de 42m.

27. — 4 avril 1907. Pont de Cé. (Génie Civil, 14 septembre 1907, p. 320.)

28. — 27 décembre 1879. Pont de la Tay. (Annales des Ponts et Chaussées, mai et novembre 1880. — Morandière, Tome 2, p. 750 et suivantes,)

Mais les ponts de Trajan ont 18 siècles, ceux d'Auguste 19; mais le Parthénon a 24 siècles, les Temples de Thèbes 34 et 37, les Pyramides 54.

Pour le fer, on compte encore par année; pour la pierre, par siècle.

On peut croire impérissable un pont en maçonnerie bien fondé, en bons matériaux, avec une bonne chape bien protégée.

§ 4. — *ILS SONT PLUS SIMPLES DE PROJET ET DE CONSTRUCTION*

Pour les ponts métalliques, il s'agit de millimètres et de kilogrammes; les projets sont délicats, quelquefois laborieux; ceux des ponts voûtés, sauf des ouvrages exceptionnels, se dressent sans calculs : ils sont faciles, courants; on s'y contente de formules empiriques.

Ce sont des entrepreneurs spéciaux qui construisent les ponts métalliques : tous les entrepreneurs peuvent faire une voûte.

Souvent, le métal vient de loin : la pierre, le sable, sont sur place ou près.

§ 5. — *SOUS CHEMIN DE FER, ON BALLASTE COMME EN PLEINE VOIE*

On ballaste les ponts en maçonnerie comme en pleine voie.

Il y a continuité dans le matelas du rail, tandis que, dans les ponts métalliques, le train passe du ballast qui fléchit sous lui à des longrines ou des traverses sur tablier rigide.

En passant sur un pont en maçonnerie, un train n'assourdit ni le voisinage, ni les voyageurs.

§ 6. — *QUELQUES CAS OÙ LE PONT VOÛTÉ EST SPÉCIALEMENT INDIQUÉ*

Art. 1. — Traversée d'une vallée profonde. —

La grande voûte en maçonnerie est spécialement indiquée par dessus une vallée profonde, à flancs raides, (il n'y a pas de culées, pas d'ouvrages d'accès).

Art. 2. — Ouvrages en courbe. —

En courbe de rayon R, une travée métallique de portée $2a$ doit être élargie de la flèche $f = \frac{a^2}{2\,R}$

Il y faut de petites ouvertures [29].

Dans les viaducs en courbe de 100m des chemins de fer d'intérêt local, la maçonnerie s'impose [30].

29. — Il y a eu économie à faire en maçonnerie avec voûtes de 16m, le viaduc de l'Altier (Ligne de Brioude à Alais), en courbe de 400m, hauteur 73m.

30. — Si R =

Si R =	300m		100m	
pour 2a =	60m	20m	60m	20m
ou a f =	1m 50	0m 17	4m 50	0m 50



CHAPITRE VI

PRÉFÉRENCE DONNÉE AUJOURD'HUI AUX PONTS VOÛTÉS

Il y a quelques années, on a été de la maçonnerie au métal.

Partout aujourd'hui, on revient du métal à la maçonnerie.

On vient de faire en maçonnerie les grands ponts de Toulouse [31], de Valence [32], d'Orléans [33], d'Avignon [34].

Les Chemins de fer de l'État d'Autriche ont préféré systématiquement aux ponts métalliques les grands ponts voûtés sur la ligne Stanislau–Woronienka 1893–1894 (ils y ont coûté moins cher) [35], sur les nouvelles lignes des Alpes [36].

En Italie, les Chemins de fer de l'État remplacent sur les lignes existantes les travées métalliques par des ponts voûtés ou en béton armé [37], et les évitent sur les nouvelles [38].

Sur les 148 kil. du Great Central Railway Extension à Londres, les arches en briques ont été, partout où on l'a pu, préférées aux arcs métalliques, à la fois pour les ponts par-dessus et par-dessous [39].

La plus grande Compagnie américaine, la Pennsylvania R.R., remplace, autant qu'elle le peut, les ponts métalliques par des ouvrages voûtés. Depuis 1900, elle a construit :

sur la Susquehanna, à Rockville, près de Harrisburg, pour 4 voies, 48 voûtes en plein cintre de 21^{m}336 (douelle en pierre de taille, queutage en béton) [40], à la place de 23 travées d'acier de 48^{m}77 sous 2 voies ;

à New-Brunswick, sur la Raritan-River, 21 arches en maçonnerie à 4 voies, (20 arches en plein cintre de 15^{m}54 à 20^{m}21, 1 biaise en arc au 1/3 de 21^{m}946) [41].

A Constantine, on a franchi le Rhumel :

en 1864, sur un arc en fonte de 57^{m}40 ;

en 1912, sur deux voûtes jumelles de 68^{m}76 [42].

31. — I, 193. 32. — I, 173.

33. — III, p. 255. Le Conseil municipal d'Orléans a mis comme condition de la participation de la Ville que le pont serait en maçonnerie (Délibérations du 2 août 1897 et du 6 avril 1899). (III, p. 264, renv. 20).

34. — III, p. 270.

35. — Geschichte der Eisenbahnen der Oesterreichisch-Ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band : « *Trassierung, Unterbau und Brückenbau, I, Der Eisenbahnneubau* », Josef Zuffer, K.K. Oberbaurat im Eisenbahnenministerium, p. 60-61.

36. — .... id............ p. 74.

37. — Pour remplacer 20 ouvrages ayant 48 travées de 5 à 41^{m}76 par 71 arches en maçonnerie ou travées en béton armé, on a dépensé 4.200.328 fr. : des tabliers neufs auraient coûté 4.339.325 fr.

Le nombre des ponts métalliques sous rails a été réduit :

sur les lignes de	Florence-Pistoie	Venise-Udine	Bologne-Ancône	Ancône-Orte	Modène-Vérone	
de	85	32	41	79	32	269
à	42	15	22	46	10	135

Bulletin de l'Association du Congrès international des Chemins de fer, Berne 1910, Janvier, volume XXIV, n° 1, p. 325 à 410. — M. Randich, Ingénieur du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'État italien.

38. — Sur 433 kil. de lignes concédées en 1888, la Compagnie des Chemins de fer méridionaux n'a posé aucun tablier métallique. L'excédent de dépense est insignifiant.

39. — The Engineer, 21 juin 1901.

40. — Engineering News, 10 mai 1900, p. 310, 311 : « *The 3820 ft stone arch bridge for the Pennsylvania RR, at Rockville. Pa* ».

Engineering News, 12 décembre 1901, p. 448 : « *Methods of construction of the 3820 ft stone arch bridge at Rockville, Pa; Pennsylvania RR.* »

41. — Engineering News, 18 juin 1903, p. 538 : « *The Raritan River stone Arch bridge of the Pennsylvania RR, at New Brunswick. NJ* ».

42. — II, p. 107.

TITRE II

VOÛTES DE 40^m DE PORTÉE ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS

1° PAR INTRADOS, 2° PAR PORTÉE, 3° PAR DATE

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

Pour le sens des symboles $\mathbf{C}^1$, $\mathbf{C}^n$, $\mathbf{E}^1$,... $\widehat{\mathbf{A}}^1$,...... r^{te}, F^r, f^r, aq, *voir Préliminaires, p. 3*

TABLEAU I — VOÛTES INARTICULÉES DE 40m ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS ET PAR INTRADOS

Type	Voie	Intrados	FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Plus gde portée	NOMBRE d'ouvrages	NOMBRE de vtes ≥ 40m
PLEINS CINTRES (Tome I)	sous route	C1 rte	1321-39 Céret 45m45 1824-31 Vieille-Brioude 45m 1860-61 St Sauveur 42m 1869-73 Collonges 40m						1899-1900 Brent 44m			45m45	5	5
		Cn rte	1745-52 Ornaisons 42m9								Avenue du Connecticut à Washington 1899-1908 45m72	45m72	2	6
	sous chemin de fer	C1 Fr	1881-82 Oloron 40m 1898-1900 Rébuzo 40m			1846-48 Ballochmyle 55m17						55m17	3	3
		C1 fr							1901-02 Solis 42m			42m	1	1
		Cn Fr	1855-56 Nogent-s-Marne 50m			1836-38 Victoria 43m89						50m	11	5
	Plus grande portée / Nombre d'ouvrages / de vtes ≥ 40m		50m (Nogent-s-Marne) 8 11			55m17 (Ballochmyle) 11 2			44m (Brent) 2 2		45m72 (Av. Connecticut) 1 5	55m17 Ballochmyle	12	20
ELLIPSES ou ANSES DE PANIER (Tome I) — SURBAISSÉES	sous route	E1 rte	1751-66 Vizille 41m08 1773-91 Lavaur 48m73 1776-1810 Gignac 48m42 1862-63 Fium'alto 40m 1886 St-Pierre 40m		1868-70 Annibal 55m 1871-72 Diable 55m	1826-27 Gloucester 45m72					Avenue Edmondson, à Baltimore 1908-09 42m37	55m	9	9
		En rte	1854-55 Alma 43m 1873-75 Mantes 40m 1895-97 Verdun-s-Doubs 41m 1901-05 Valence 49m20			1824-31 Londres 46m33 42m67 Edouard VII, à Kew 1901-03 40m54		Empereur-François à Prague 1898-1901 42m34				49m20	7	12
		En En rte	1904-07 Amidonniers 46m / 42m									46m	1	6
		En aq	1870-73 Pont-s'-Yonne 40m									40m	1	1
	sous ch. de fer	E1 Fr	1871-72 Signac 40m 1905-06 Verdon 40m									40m	2	2
		En Fr									Big-Muddy-Rivr 1901-03 42m67	42m67	1	3
SURHAUSSÉES		E1h fr							1907-09 Wiesen 55m			55m	1	1
	Plus grande portée / Nombre d'ouvrages / de vtes ≥ 40m		49m20 (Valence) 13 21		55m (Annibal, Diable) 2 2	46m33 (Londres) 3 5		42m34 (Empr François) 1 1	55m (Wiesen) 1 1		42m67 (Big-Muddy-Rr) 2 4	55m Annibal Diable Wiesen	22	34
PEU SURBAISSÉS ≥ 1/2,3 (Tome II)	sous route	Â1 rte	1340-1479 Vieille-Brioude 54m26 (Ancien Pt, écroulé en 1822) 1351-1407 Nyons 40m53 1351-1583 Tournon 49m20 1608-11 Claix 46m35		1832-36 Crespano 40m40			1842-46 St-Etienne 43m60	1840-44 Nydeck 45m90			49m20	72	72
		Â1 Â1 rte	1908-12 Sidi-Rached, à Constantine 68m76	Adolphe 1899-1903 84m65							Walnut-Lane 1906-08 70m71 Rocky-River 1908-10 85m34	85m34	4	8
	sous chemin de fer	Â1 Fr	1860-61 Berdoulet 40m 1882-83 Castelet 41m20 1882-84 Lavaur 61m50 1883-84 Antoinette 50m 1883-85 Céret 45m 1907-09 Escot 56m				Kleinwolmsdorf 1844-45 45m32	Wäldlitobel 1883-84 41m Palmgraben 1904-05 49m Schalchgraben 1904-05 52m Rothweinbach 1904-06 41m				61m50	11	11
		Â1 fr	1884 Gravona 43m53 1906-08 Ramounails 40m30						46m98 Cinuskel 1910-12 1911-12 Tuoi 47m71			47m71	1	4

	Nomb. d'ouvrages / de v^tes ≥ 40m	13² 14²	1 2	1 1	1 1	1 1	5	3		4	River		81³
ARCS — ASSEZ SURBAISSÉS 1/2,3 > ρ > 1/7 — sous route	Â¹ r^te	1873-74 Claix 52m 1882 Saulnier 43m (écroulé en 1912) 1908-09 Montanges 80m29		1370-77 Trezzo 72m détruit en 1416 Bains-de-Lucques, 1845-47, 74-77 47m84	Pont-y-tu-Pridd 1749-50 42m67 Chester 1833-34 60m96	1903-05 Plauen 90m		Guggersbach 1906 50m20		1886 Elyria 45m72 1891-92 Wheeling 48m46 1896-97 Bellefield 45m72	90m	12²	12²
	Âⁿ r^te	1908-11 Seythenex 41m19		1354-56 Vérone 48m70							48m70	2	2
	Â¹ aq									1857-64 Cabin-John 67m10	67m10	1	1
sous chemin de fer	Â¹ F^r	1888-89 Gour-Noir 62m 1890 Pouch 47m85 1890-91 Freyssinet 45m 1908-10 Lusserat 45m70		1851-52 Maretta 40m 1851-52 Prarolo 40m 1852 Isola del Cantone 40m P^t en amont et P^t en aval 1877-78 Calcio 42m 1901-02 Diveria 40m		1899-1900 Gutach 64m 1899-1900 Schwändeholzdobel 57m 1901-02 Chemnitz 45m 1907-09 Langenbrand 59m	1893-94 Jaremcze 65m Jamna 48m Worochta 40m 1904-1905 Krenngraben 40m Steyrling 70m 1904-06 Salcano 85m	Lichtensteig 1907-09 42m82 Krummenau 1910-11 63m26	Strandeelven 1902-04 41m Svenkerud 1905-07 44m Bollefos 1908-19.. 40m		85m	25	25
	Âⁿ F^r						1904-06 Canale 40m				40m	1	3
	Plus grande portée	80m29 (Montanges)		48m70 (Vérone)	60m96 (Chester)	90m (Plauen)	85m (Salcano)	63m26 (Krummenau)	44m (Svenkerud)	67m10 (Cabin-John)	90m Plauen		
	Nombre d'ouvrages / de v^tes ≥ 40m	8² 8²		9³ 9³	2 2	5 5	7 9	3 3	3 3	4 4		41²	48²
TRÈS SURBAISSÉS ρ ≤ 1/7 (Tome III) — sous route	Â¹ r^te			1834 Mosca, à Turin 45m		1882 Teinach 46m 1889 Huzenbach 41m50 1904 Wengern 50m 1905 Ziegenhals 40m 1905-06 Michelau 42m 1905 Neuhammer 52m 1907 Schwusen 48m 1907 Kupferhammer 48m					52m	9	9
	Âⁿ r^te	1888-90 Boucicaut 40m 1904-06 Orléans 43m85 1905-09 Avignon 40m			1882-83 Putney 43m89	1903-04 Mehring 46m 1905 Krappitz 50m 1906 Gross-Kunzendorf 40m 1905-06 Schweich 46m 1907-08 Trittenheim 46m 1909-11 Longuich 46m43					50m	10	38
	Â¹ aq					1885 Weisenbach 40m					40m	1	1
	Â¹ F^r									1899 Bellows-Falls 42m67	42m67	1	2
	Plus grande portée	43m85 (Orléans)		45m (Mosca, à Turin)	43m89 (Putney)	52m (Neuhammer)				42m67 (Bellows-Falls)	52m Neuhammer		
	Nomb. d'ouvrages / de v^tes ≥ 40m	3 22		1 1	1 1	15 24				1 2		21	50
Pour toutes les v^tes en arc	Plus grande portée	80m29 (Montanges)	84m65 (Adolphe)	48m70 (Vérone)	60m96 (Chester)	90m (Plauen)	85m (Salcano)	63m26 (Krummenau)	44m (Svenkerud)	85m34 (Rocky-River)	90m Plauen		
	Nombre d'ouvrages / de v^tes ≥ 40m	24² 44²	1 2	11 11	4 4	21 30	12 14	6 6	3 3	7 10		89⁵	124⁵
Pour toutes les voûtes	Plus grande portée	80m29 (Montanges)	84m65 (Adolphe)	55m (Annibal, Diable)	60m96 (Chester)	90m (Plauen)	85m (Salcano)	63m26 (Krummenau)	44m (Svenkerud)	85m34 (Rocky-River)	90m Plauen		
	Nombre d'ouvrages / de v^tes ≥ 40m	45⁴ 76⁴	1 2	13³ 13³	8 11	21 30	13 15	9 9	3 3	10 19		123⁵	178⁵

1. Le pont Victoria, a une voûte en plein cintre de 43m89 et une voûte en arc peu surbaissé de 48m77 il est compté dans les « Arcs peu surbaissés ».
2. Dont 1 écroulé(e). 3. Dont 1 ruiné(e). 4. Dont 2 écroulé(e)s. 5. Dont 1 ruiné (e) et 2 écroulé(e)s

TABLEAU II VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES DE 40m ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS ET PAR DATE

Les voûtes articulées sont en italiques.

Siècle		FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Plus gde Portée	NOMBRE d'ouvrages	NOMBRE de vtes ≥ 40m
XIVe		1321-39 Céret (Vieux Pt) Ct rie 45m45		1354-56 Vérone At rie 48m70 1370-77 Trezzo At rie 72m détruit en 1416							72m détruite 48m70	31	31
XVe		1340-1479 Vieille-Brioude (Anc. Pt) écroulé en 1822 At rie 54.26 1351-1407 Nyons At rie 40.53 1351-1583 Tournon At rie 49.20									54m26 écroulée 49m20	32	32
XVIe													
XVIIe		1608-11 Claix (Vieux Pt) At rie 46.35									46m35	1	1
XVIIIe	1701-1750	1745-52 Ornaisons Ct rie 42.90			1749-50 Pont-y-tu-Pridd At rie 42m67						48m73	5	5
	1751-1800	1751-66 Vizille Et rie 41.08 1773-91 Lavaur (Vieux Pt) Et rie 48.73 1776-1810 Gignac Et rie 48.42											
XIXe	1801-1825										Voûtes inarticulées 67m10	60[2]	71[2]
	1826-1850	1824-31 Vieille-Brioude (Pont actuel) Ct rie 45		1834 Mosca, à Turin At rie 45m 1845-47, 1874-77 Bains-de-Lucques At rie 47m84 1832-36 Crespano At rie 40m40	1824-31 Londres Et rie 46m33, 42m67 1826-27 Gloucester Et rie 45m72 1833-34 Chester At rie 60m96 1836-38 Victoria At Fr 48m77, 43m89 1846-48 Ballochmyle Ct Fr 55m17	1844-45 Kleinwolmsdorf At Fr 45m32	1842-46 St-Etienne At rie 43m60	1840-44 Nydeck At rie 45m90					
	1851-1880	1854-55 Alma Et rie 43m 1855-56 Nogent-s'-Marne Ct Fr 50 1860-61 St-Sauveur Ct rie 42 1860-61 Berdoulet At Fr 40 1862-63 Fium'Alto Et rie 40 1869-73 Collonges Ct rie 40 1870-73 Pont-s'-Yonne Et aq 40 1871-72 Signac Et Fr 40 1873-74 Claix At rie 52 1873-75 Mantes Et rie 40		1851-52 40m Maretta, Prarolo At Fr 1852 Isola del Cantone Pt en amont et Pt en aval At Fr 40m 1868-70 Annibal Et rie 55m 1871-72 Diable Et rie 55m 1877-78 Calcio At Fr 42m						1857-64 Cabin-John At aq 67m10	Voûtes articulées *59m40*	*10*	*13*
	1881-1890	1881-82 Oloron Ct Fr 40 1882 Saulnier écroulé en 1912 At rie 43 1882-83 Castelet At Fr 41.20 1882-84 Lavaur At Fr 61.50 1883-84 Antoinette At Fr 50 1884 Gravonu At Fr 43.53 1883-85 Céret At Fr 45 1886 St-Pierre Et rie 40 1888-89 Gour-Noir At Fr 62 [illegible]			1882-83 Putney At rie 43m89	1882 Teinach At rie 46m 1885 Weisenbach At aq 40m *1885 Höfen At rie 41m* *1886-87 Marbach At rie 43m50* 1889 Huzenbach At rie 41m50 *1889 Baiersbronn At rie 40m*	1883-84 Wäldlitobel At Fr 41m			1886 Elyria At rie 45m72			

1891-1900	... Doubs ... F' 40 1898-1900 Rébuzo C' F' 40				1899-1900 { Gutach A' F' 64m Schwände-holzdobel A' F' 57m *Neckarhausen* A' r'' 59m40 *Grasdorf* A' r'' 40m } 1899-1901 *Malling* A' r'' 40m	Worochta 40m 1898-1901 Emp'-François, à Prague E' r'' 42m34	A' r'' 40m 1899-1900 Brent C' r'' 44m		A' r'' 45m72 1899 Bellows-Falls A' F' 42m67			
XXe	1901-05 Valence En r'' 49.20 1904-06 Orléans Aa r'' 43.85 1904-07 Amidonniers E'E' r'' 46m & 42 1905-06 Verdon E' F' 40 1905-09 Avignon A' r'' 40 1906-08 Ramounails A' f' 40.30 1907-09 Escot A' F' 56 1908-09 Montanges A' r'' 80.29 1908-11 Seythenex A' r'' 41.19 1908-10 Lusserat A' F' 45.70 1908-12 Constantine A' A' r'' 68.76	1899-1903 Adolphe A' A' r'' 84m65	1901-02 Diveria A' F' 40m *1902-03 Morbegno A' F' 70m*	1901-03 Edouard VII à Kew E' r'' 40m54	*1900-01 Prince-Régent* A' r'' 63m 1901-02 Chemnitz A' F' 45m *1901-02 Max-Joseph* A' r'' 64m *1901-03 Hochberg* A' r'' 40m *1902-03 Cornélius* A' r'' 44m *1902-03 Reichenbach* A' r'' 44m *1903-04 Illerbeuren* A' F' 59m 1903-04 Mehring A' r'' 46m *1903-04 Göhren* A' r'' 60m 1903-05 Plauen A' r'' 90m *1903-05 Neckargartach* A' r'' 40m *1903-05 Maximilien* A' r'' 45m87 1904 Wengern A' r'' 50m *1904-05 Wallstrasse* A' r'' 65m45 *1904-05 Moulins-lez-Metz* A' r'' {44m 40m} *1904-05 Wittelsbach* A' r'' 44m 1905 Ziegenhals A' r'' 40m 1905 Krappitz A' r'' 50m 1905-06 Michelau A' r'' 42m 1905-06 Schweich A' r'' 46m *1905-08 Mannheim* A' r'' 59m50 1905 Neuhammer A' r'' 52m 1906 Gross-Kunzendorf A' r'' 40m *1906 Kempten* A' F' {64m50 63m80} *1906-07 Elise* A' r'' 47m50 1907 Schwusen A' r'' 48m 1907 Kupferhammer A' r'' 48m 1907-08 Trittenheim A' r'' 46m *1907-08 Garching* E' F' 44m35 1907-09 Langenbrand A' Fr 59m 1909-11 Longuich A' r'' {46m 43m} *1911-12 Gräveneck* A' r'' 48m	1904-05 A' F' Krenngraben 40m Palmgraben 49m Schalch-graben 52m Steyrling 70m 1904-06 A' Fr Salcano 85m Rothwein-bach 41m 1904-06 Canale A' F' 40m	1901-02 Solis C' f' 42m 1906 Guggers-bach A' r'' 50m20 1907-09 Wiesen E'h f' 55m 1907-09 Lichten-steig A' F' 42m82 1910-11 Krum-menau A' Fr 63m26 1910-12 Cinuskel A' f' 46m98 1911-12 Tuoi A' f' 47m71	1902-04 Strande-elven A' F' 41m 1905-07 Svenkerud A' F' 44m 1908-19 Boïlefos A' F' 40m	1899-1908 Avenue du Connecticut à Washington C' r'' 45m72 1901-03 Big-Muddy E' F' 42m67 1906-08 Walnut Lane à Philadelphie A' A' r'' 70m71 1908-09 Avenue Edmondson à Baltimore E' r'' 42m37 1908-10 Rocky-River près de Cleveland A' A' r'' 85m34	Voûtes inarticulées **90m** *Voûtes articulées* *70m*	51 *20*	95 *29*
Plus gdes voûtes — inarticulées	80m29 (Montanges)	84m65 (Adolphe)	48m70 (Vérone)	60m96 (Chester)	90m (Plauen)	85m (Salcano)	63m26 (Krummenau)	44m (Svenkerud)	85m34 (Rocky-River)	**90m**		
Plus gdes voûtes — articulées	»	»	*70m Morbegno*	»	*65m45 (Wallstrasse)*	»	*40m (Coulouvrenière)*	»	»	*70m*		
Nombre d'ouvrages — inarticulés	45[3]	1	13[1]	8	21	13	9	3	10		123[4]	
Nombre d'ouvrages — articulés	»	»	*1*	»	*28*	»	*1*	»	»		*30*	
Nombre de vtes ≥ 40m — inarticulées	76[3]	2	13[1]	11	30	15	9	3	19		178[4]	
Nombre de vtes ≥ 40m — articulées	»	»	*1*	»	*39*	»	*2*	»	»		*42*	

1. — Dont 1 ruiné(e). 2. — Dont 1 écroulé(e). 3. — Dont 2 écroulé(e)s. 4. — Dont 1 ruiné(e) et 2 écroulé(e)s.

TABLEAU III VOÛTES INARTICULÉES ET ARTICULÉES DE 40m ET PLUS, CLASSÉES PAR PAYS ET PAR PORTÉE

Les voûtes articulées sont en italiques.

Portée de exclus	Portée à inclus	FRANCE	LUXEMBOURG	ITALIE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	AUTRICHE	SUISSE	NORVÈGE	ÉTATS-UNIS	Nombre d'ouvrages inarticulés	Nombre d'ouvrages *articulés*	Nombre de voûtes ≥ 40m inarticulées	Nombre de voûtes ≥ 40m *articulées*
	90					Plauen 1903-05 A' r'' 90m					1		1	
90	85						Salcano 1904-06 A' F' 85m			Rocky River près de Cleveland 1908-10 A' A' r'' 85m34	2		3	
85	80	Montanges 1908-09 A' r'' 80m29	Adolphe 1899-1903 A' A' r'' 84m65								2		3	
80	75													
75	70			Trezzo 1370-77 ruiné en 1416 A' r'' 72m *Morbegno* 1902-03 A' r'' 70m			Steyrling 1904-05 A' F' 70m			Walnut Lane à Philadelphie 1906-08 A' A' r'' 70m71	3[1]	*1*	4[1]	*1*
70	65	Sidi-Rached, à Constantine 1908-12 A' A' r'' 68m76				*Wallstrasse à Ulm 1904-05* A' r'' *65m45*	Jaremcze 1893-94 A' F' 65m			Cabin-John 1857-64 A' aq 67m10	3	*1*	1	*1*
65	60	Gour-Noir 1888-89 A' F' 62m Lavaur 1882-84 A' F' 61.50			Chester 1833-34 A' r'' 60m96	*Kempten (1 Pont à 2 voies) 1906* A' F' *64m50* Gutach 1899-1900 A' F' 64m *Max-Joseph, à Munich 1901-02* A' r'' *64m* *Kempten (2 Pts à 2 voies, accolés) 1906* A' F' *63m80* *Prince-Régent, à Munich 1900-01* A' r'' *63m* *Göhren 1903-04* A' r'' *60m*		Krummenau 1910-11 A' F' 63m26			5	*6*	5	*6*
60	55	Escot 1907-09 A' F' 56m		Annibal 1868-70 E' r'' 55m Diable 1871-72 E' r'' 55m	Ballochmyle 1846-48 C' F' 55m17	*Mannheim 1905-08* A' r'' *59m50* *Neckarhausen 1899-1900* A' r'' *59m40* *Munderkingen 1893* A' r'' *59m* Langenbrand 1907-09 A' F' 59m *Illerbeuren 1903-04* A' F' *59m* Schwändeholzdobel 1899-1900 A' F' 57m		Wiesen 1907-09 E'h f' 55m			7	*4*	7	*5*
55	50	Vieille-Brioude 1340-1479 A' r'' 54m26 Ancien Pt écroulé en 1822 Claix 1873-74 A' r'' 52m Antoinette 1883-84 A' F' 50m				Neuhammer 1905 A' r'' 52m Wengern 1904 A' r'' 50m Krappitz 1905 A' r'' 50m	Schalchgraben 1904-05 A' F' 52m	Guggersbach 1906 A' r'' 50m20			9[2]		12[2]	

50	45	Tournon 1351-1583 A' r'' 49.20 Lavaur (Vieux P[t]) 1773-91 E' r'' 48.73 Gignac 1776-1810 E' r'' 48.42 Pouch 1890 A' F' 47.85 Claix 1608-11 A' r'' 46.35 Amidonniers 1904-07 E' E' r'' 46 Lusserat 1908-10 A' F' 45.70 Céret (Vieux P[t]) 1321-39 C' r'' 45.45 Freyssinet 1890-91 A' F' 45 Céret 1883-85 A' F' 45 Vieille-Brioude 1824-31 C' r'' 45 (Pont actuel)		A' r'' 48m70 Bains-de-Lucques 1845-47, 74-77 A' r'' 47m84 Mosca, à Turin 1834 A' r'' 45m	A' r' 48m77 Londres 1824-31 E' r'' 46m33 Gloucester 1826-27 E' r'' 45m72	Kupferhammer 1907 A' r'' 48 *Gräeneck* *1911-12* A' r'' *48m* *Inzigkofen* *1895* A' r'' *47m90* *Elise* *1906-07* A' r'' *47m50* Teinach 1882 A' r'' 46m Mehring 1903-04 } Schweich 1905-06 } A' r'' 46m Trittenheim 1907-08 } Longuich 1909-11 } *Maximilien* *1903-05* A' r'' *45m87* Kleinwolmsdorf 1844-45 A' F' 45m32 Chemnitz 1901-02 A' F' 45m	1904-05 A' F' 49m Jamna 1893-94 A' F' 48m	[illegible] Cinuskel 1910-12 A' f' 46m98 Nydeck 1840-44 A' r'' 45m90		1891-92 A' r'' 48m46 Elyria 1886 A' r'' 45m72 Bellefield à Pittsburg 1896-97 A' r'' 45m72 Avenue du Connecticut à Washington 1899-1908 C' r'' 45m72	34	4	51	5
45	40	Orléans 1904-06 A' r'' 43m85 Gravona 1884 A' f' 43.53 Alma 1854-55 E' r'' 43 Saulnier 1882 A' r'' 43 (écroulé en 1912) Ornaisons 1745-52 C' r'' 42.90 Amidonniers 1904-07 E' E' r'' 42 Saint-Sauveur 1860-61 C' r'' 42 Castelet 1882-83 A' F' 41.20 Seythenex 1908-11 A' r'' 41.19 Vizille 1751-66 E' r'' 41.08 Verdun-s-l-Doubs 1895-97 E' r'' 41 Nyons 1351-1407 A' r'' 40.53 Ramounails 1906-08 A' f' 40.30 Berdoulet 1860-61 A' F' } Fium'Alto 1862-63 E' r'' } Collonges 1869-73 C' r'' } Pont-sur-Yonne 1870-73 E' aq } Signac 1871-72 E' F' } Mantes 1873-75 E' r'' } 40m Oloron 1881-82 C' F' } St-Pierre 1886 E' r'' } Boucicaut 1888-90 A' r'' } Rébuzo 1898-1900 C' F' } Verdon 1905-06 E' F' } Avignon 1905-09 A' r'' }		Calcio 1877-78 A' F' 42m Crespano 1832-36 A' r'' 40m40 40m, A' F' : Maretta 1851-52 Prarolo 1851-52 Isola del Cantone 1852 Pont en amont et Pont en aval Diveria 1901-02	Victoria 1836-38 A' F' 43m89 Putney 1882-83 A' F' 43m89 Pont-y-tu-Pridd 1749-50 A' r'' 42m67 Edouard VII, à Kew 1901-03 E' r'' 40m54	*Garching* *1907-08* E' *F' 44m35* *Cornélius* *1902-03* } *Reichenbach* *1902-03* } A' r'' *44m* *Wittelsbach* *1904-05* } *Moulins-les-Metz* *1904-05* } *Marbach* *1886-87* A' r'' *43m50* *Chemnitz* *1898-1900* E' *F' 43m10* Longuich 1909-11 A' r'' 43m Michelau 1905-06 A' r'' 42m Huzenbach 1889 A' r'' 41m50 *Höfen* *1885* A' r'' *41m* Weisenbach 1885 A' aq } *Baiersbronn* *1889* A' r'' } *Grasdorf* *1899-1900* A' r'' } *Malling* *1899-1901* A' r'' } *Hochberg* *1901-03* A' r'' } 40m *Neckargartach* *1903-05* A' r'' } *Moulins-les-Metz* *1904-05* A' r'' } Gross-Kunzen-dorf 1906 A' r'' } Ziegenhals 1905 A' r'' }	Saint-Etienne 1842-46 A' r'' 43m60 Empereur-François 1898-1901 E' r'' 42m34 Wäldlitobel 1883-84 A' F' 41m Rothweinbach 1904-06 A' F' 41m Worochta 1893-94 A' F' 40m Krenngraben 1904-05 A' F' 40m Canale 1904-06 A' F' 40m	Brent 1899-1900 C' r'' 44m Lichtensteig 1907-09 A' F' 42m82 Solis 1901-02 C' f' 42m *Coulouvrenière* *1895-96* A' r'' *40m*	Svenkerud 1905-07 A' F' 44m Strandeelven 1902-04 A' F' 41m Boflefos 1908-19.. A' F' 40m	Bellows-Falls 1899 A' F' 42m67 Big-Muddy 1901-03 E' F' 42m67 Avenue Edmondson à Baltimore 1908-09 E' r'' 42m37	37[2]	14	88[2]	24

1. — Dont 1 ruiné(e).   2. — Dont 1 écroulé(e).

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE DEPUIS 1339

IV. — A SUIVANT LA FORME DE L'INTRADOS

A partir de :	VOÛTES INARTICULÉES — C	E	E_h	Â	Â	Â	VOÛTES — SEMI-ARTICULÉES	ARTICULÉES
1339 1356	45^{m}45 **Céret** (Vieux Pont) C^1 r^{te} *France*				48^{m}70 **Vérone** A^n r^{te} *Italie*			
1377 1407				40^{m}53 **Nyons** A^1 r^{te} *France*	72^{m}25 **Trezzo** (détruit en 1416) A^1 r^{te} *Italie*			
1416 1479 1766		41^{m}08 **Vizille** E^1 r^{te} *France*		54^{m}26 **Vieille-Brioude** (Ancien Pont, écroulé en 1822) A^1 r^{te} *France*	48^{m}70 **Vérone** A^n r^{te} *Italie*			
1791		48^{m}73 **Lavaur** (Vieux Pont) E^1 r^{te} *France*						
1822 1834 1848	55^{m}17 **Ballochmyle** C^1 F^r *Angleterre*			49^{m}20 **Tournon** A^1 r^{te} *France*	60^{m}96 **Chester** A^1 r^{te} *Angleterre*	45^m **Mosca,** à Turin A^1 r^{te} *Italie*		
1864 1870 1882 1884 1885		55^m **Annibal** E^1 r^{te} *Italie*		61^{m}50 **Lavaur** A^1 F^r *France*	67^{m}10 **Cabin-John** A^1 aq *Etats-Unis*	46^m **Teinach** A^1 r^{te} *Allemagne*	41^m **Höfen** A^1 r^{te} *Allemagne*	
1887							43^{m}50 **Marbach** A^1 r^{te} *Allemagne*	
1893 1895							59^m **Munderkingen** A^1 r^{te} *Allemagne*	47^{m}90 **Inzigkofen** A^1 r^{te} *Allemagne*
1900								59^{m}40 **Neckarhausen** A^1 r^{te} *Allemagne*
1901								63^m **Prince-Régent** A^1 r^{te} *Munich*
1902 1903 1904				84^{m}65 **Adolphe à Luxembourg** A^1 A^1 r^{te} *Luxembourg*		50^m **Wengern** A^1 r^{te} *Allemagne*	70^m **Morbegno** A^1 F^r *Italie*	64^m **Max-Joseph** à Munich A^1 r^{te} *Allemagne*
1905 1909			55^m **Wiesen** E^1_h f^r *Suisse*		90^m **Plauen** A^1 r^{te} *Allemagne*	52^m **Neuhammer** A^1 r^{te} *Allemagne*		65^{m}45 **Wallstrasse** à Ulm A^1 r^{te} *Allemagne*
1910				85^{m}34 **Rocky-River** A^1 A^1 r^{te} *Etats-Unis*				

IV. — B SANS TENIR COMPTE DE LA FORME DE L'INTRADOS

Toutes ces voûtes sont inarticulées

De – à	soit pendant (1-2)	La plus grande voûte a été celle du Pont de :	Portée	Plus grande que la précédente de :	Pays
1339 – 1356	17 ans	**Céret** (Vieux Pont) C^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	45^{m}45	»	*France*
1356 – 1377	21	**Vérone** Â^n r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	48^{m}70	3^{m}25	*Italie*
1377 – 1416	39	**Trezzo** (ruiné en 1416) Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	72^m	23^{m}30	*Italie*
1416 – 1479	63	**Vérone** Â^n r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	48^{m}70	»	*Italie*
1479 – 1822	343	**Vieille-Brioude** Ancien P^t écroulé en 1822 Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	54^{m}26	5^{m}56	*France*
1822 – 1834	12	**Tournon** Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[3]	49^{m}20	»	*France*
1834 – 1862	28	**Chester** Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[3]	60^{m}96	11^{m}76	*Angleterre*
1862 – 1903	41	**Cabin-John** Â^1 aq ($\geqslant$ 40^m)[1]	67^{m}10	6^{m}14	*Etats-Unis*
1903 – 1905	2	**Luxembourg** Â^1 Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[1]	84^{m}65	17^{m}55	*Luxembourg*
1905 –		**Plauen** Â^1 r^{te} ($\geqslant$ 40^m)[10]	90^m	5^{m}35	*Allemagne*

1. — Existaient alors : le Pont sur le Serchio, près de Lucques (36^{m}80, an 1000, (Φ$_2$, p. 83) Croizette-Desnoyers, Tome 1, p. 36, Pl. IV, fig. 12 ; le Pont d'Avignon (plus grande arche : 34^{m}80 — XIIe siècle), T II, p. 25 renvoi 3 ; le Pont Saint-Esprit (plus grande arche 35^{m}20 — XIIIe siècle, T II, p. 25 renvoi 5.

La plus grande voûte romaine, celle du Pont Auguste, à Narni, avait 31^{m}75 ? Elle est ruinée (III, p. 317).

2. — Sont peut-être aussi du XIVe, les Ponts de St-Martin sur le Tage, à Tolède,

TITRE III

POURQUOI N'A-T-ON PAS ENCORE FAIT DE VOÛTES DE PLUS DE 100^{m} ?

Aujourd'hui, on a d'excellents ciments, on sait faire une voûte : il est permis d'être hardi, et on n'y court pas grand risque : une voûte bien fondée, bien faite, en bons matériaux, ne peut tomber [1, 2, 3, 4, 5].

Il y a quelque 120 ans, Perronet recherchait « *les moyens que l'on pourrait* « *employer pour construire de grandes arches de pierre de 200, 300, 400 et* « *jusqu'à 500 pieds d'ouverture, qui seraient destinées à franchir de profondes* « *vallées bordées de rochers escarpés* » [6] (65^{m}, 97^{m}, 130^{m}, 162^{m}).

Plauen [7] a 90^{m} de portée et, sur 30^{m} de part et d'autre de la clef, 105^{m} de rayon : c est le cerveau d'un plein cintre de 210^{m}.

On a déjà étudié des voûtes de 100^{m} [8, 9, 10] et plus [11, 12, 13].

1. — Le pont de Trezzo (III, p. 19) n'est pas tombé : on l'a jeté par terre.

2. — La voûte de Vieille-Brioude (II, p. 15) a péri parce qu'elle était en un tuf tendre, usé, pourri, et qu'on l'a mal garantie. Cependant, elle a duré environ quatre siècles : il a fallu, pour en venir à bout, la surcharger de remblai, et encore y a-t-elle résisté quelques années.

3. — Les voûtes de Neuilly (anses de panier de 39^{m} au 1/4) ont, sans accident, tassé après la pose de la clef de 63^{c} (V, p. 171, renvoi 14).

Sans que les voûtes fussent compromises, les piles de l'Alma ont tassé de 37^{c} et 51^{c} (I, p. 157), celles de Nantes, de 27^{c}, 40^{c}, 47^{c} (Morandière, *Construction des Ponts*, p. 379).

4. — Voûtes d'essai en arc très surbaissé de Vassy et de Souppes (III, p. 375) ; voir aussi V, p. 20.

5. — La voûte articulée en béton de l'Exposition de Dusseldorf, 1902, tenait encore à 196^{k} de pression, 30^{k} de tension (IV, p. 278, renvoi 9).

6. — Paris, Imprimerie du Louvre, 1793.

7. — III, p. 52.

8. — M. Tourtay en a esquissé un projet : voûte mince à 3 articulations, de 64^{m} de portée, 8^{m} de flèche, appuyée sur des culées épaisses en surplomb de 18^{m} ; intrados, extrados et chaussée en chaînette, tympans évidés ; épaisseur à la clef $1^{m}40$; pression moyenne, 31^{k}.

(Génie Civil, 18 juin 1892).

9. — Pour un pont-route sur le Rhin à Worms, on avait proposé une arche de 100^{m} entre 2 de 96^{m}, en briques, à 3 articulations de basalte.

(Allgemeine Bauzeitung, 1898, p. 19 à 24, Pl. 10 à 12 : « *Entwurf für eine gewölbte Strassenbrücke über den Rhein bei Worms* » MM. Krone et Ebhardt).

10. — Projet récemment approuvé d'un pont en béton à Villeneuve-sur-Lot (Chemins de fer départementaux de Lot-et-Garonne) : 2 arcs jumeaux en béton, larges de 3^{m}, espacés de $4^{m}90$; portée 98^{m} ; montée $15^{m}39$; épaisseur à la clef, $1^{m}45$, aux retombées, $3^{m}30$.

(Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Exécution : MM. F. Mercier et Limousin, Entrepreneurs).

11. — Un des projets du pont sur le Neckar à Mannheim, étudié par M. Probst, présenté par la maison Grün et Bilfinger (1901), comportait une arche de 113^{m} entre deux de 60^{m}, toutes trois très surbaissées, à 3 articulations. — Joli et hardi projet, primé, non exécuté.

Pour le pont exécuté (1905-08), voir IV, p. 206.

12. — Pour le viaduc de la Sitter (ligne du lac de Zurich au lac de Constance), M. Acatos avait proposé, au lieu de la travée métallique de 120^{m} exécutée, une arche en maçonnerie, inarticulée, en anse de panier surhaussée : Portée, $121^{m}35$; montée, $64^{m}99$; rayons, au cerveau $54^{m}265$, aux reins, $66^{m}421$; épaisseurs, à la clef 2^{m}, aux retombées (à $40^{m}94$ sous la clef), $4^{m}58$.

(Dessins gracieusement remis par M. Acatos).

13. — On vient de commencer les fondations d'une voûte en béton de 173^{m} de portée (Pont du Bernand, Loire, ligne d'intérêt local de Balbigny à Régny), surbaissement environ 1/6,5, épaisseur à la clef, $2^{m}10$.

Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Exécution : MM. F. Mercier, Président du Conseil d'Administration des Chemins de fer du Centre, et Limousin, Entrepreneurs.

Dans une très grande voûte, on fera travailler les matériaux jusqu'au quart de leur charge de rupture. [14]

On y abaissera les pressions en donnant du fruit aux têtes, en ajourant largement les tympans, en employant pour les parties qui travaillent peu [15] des matériaux légers [16], par exemple de la brique.

Il y faut de bonnes pierres, de bon mortier, des appuis qui ne reculent pas, qui ne s'enfoncent pas.

En coupant les rouleaux en tronçons, en matant au refus les joints vides, en laissant longtemps la voûte sur cintre, on prévient les fissures sur cintre et au décintrement.

Une grande voûte ne coûtera pas très cher si on sait se défendre des recherches d'appareil qu'entraîne trop naturellement un grand ouvrage. Si on employe de petits matériaux, une petite installation suffira ; si on construit par rouleaux, les cintres seront légers.

Elle sera vite faite, si on y occupe autant d'équipes de maçons que le cintre a de vaux.

Pendant la construction, l'Ingénieur vivra sur la voûte et ne s'en remettra à personne, — je dis, à personne, — de la surveillance aux moments et aux points critiques.

14. — V, p. 20. 15. — V, p. 49, renvoi 3. 16. — V, p. 49, renvoi 2.

TITRE IV

PROGRÈS DES GRANDES VOÛTES DEPUIS 1880

§ 1. — AUGMENTATION DES PORTÉES ; AUGMENTATION DU NOMBRE, DU SURBAISSEMENT, DU RAYON DE COURBURE AU CERVEAU DES VOÛTES DE 40m ET PLUS

Art. 1. — Augmentation des portées.

Voûtes — Voie portée		Intrados	1880 Portée	1880 Pont	1880 Tome page	1913 Portée	1913 Pont	1913 Tome page	Augmentation de la plus grande portée
inarticulées	sous route	Pleins cintres	m 45.45	Céret	I, 15	m 45.72	Connecticut Ave	I, 67	m 0.27
		Ellipses	55	Diable	I, 116	55	Diable	I, 116	0
		Arcs peu surbaissés	49.20	Tournon	II, 35	85.34	Rocky River	II, 95	36.14
		Arcs assez surbaissés	60.96	Chester	III, 29	90	Plauen	III, 52	29.04
		Arcs très surbaissés	45	Mosca	III, 199	52	Neuhammer	III, 211	7
	sous conduite d'eau	Ellipses	40	Pont-sur-Yonne	I, 213	40	Pont-sur-Yonne	I, 213	0
		arcs assez surbaissés	67.10	Cabin-John	III, 75	67.10	Cabin-John	III, 75	0
		arcs très surbaissés	*Pas de voûte de 40m ou plus*			40	Weisenbach	III, 219	»
	sous chemin de fer	Plein cintres	55.17	Ballochmyle	I, 41	55.17	Ballochmyle	I, 41	0
		Ellipses surbaissées	40	Signac	I, 131	42.67	Big Muddy River	I, 225	2.67
		Ellipses surhaussées	*Pas de voûte de 40m ou plus*			55	Wiesen	I, 235	»
		Arcs peu surbaissés	48.77	Victoria	II, 201	61.50	Lavaur	II, 135	12.73
		Arcs assez surbaissés	42	Calcio	III, 100	85	Salcano	III, 141	43
		Arcs très surbaissés	*Pas de voûte de 40m ou plus*			42.67	Bellow-Falls	III, 225	»
semi-articulées	sous route		*Pas de voûtes articulées avant 1880*			*59*	*Munderkingen*	IV, 55	»
	sous chm de fer					*70*	*Morbegno*	IV, 65	»
articulées	sous route					*65.45*	*Wallstrasse*	IV, 143	»
	sous chm de fer					*64.50*	*Kempten*	IV, 115	»

Pas d'augmentation de portée, ou augmentation insignifiante, pour les pleins cintres, les ellipses surbaissées.

Art. 2. — Augmentation du nombre de voûtes de 40^{m} et plus.

Voûtes : Voie portée — Intrados			Nombre d'ouvrages ayant des voûtes de 40^{m} et plus: en 1880		en 1913		Augmentation		Nombre de voûtes de 40^{m} et plus: en 1880		en 1913		Augmentation	
inarticulées	sous route	Pleins cintres	5		7		*2*		5		11		*6*	
		Ellipses	10		17		*7*		12		27		*15*	
		Arcs peu[1] surbaissés	6	27	10	65	*4*	* *38*	6	29	14	111	*8*	*82*
		Arcs assez[1] surbaissés	5		12		*7*		5		12		*7*	
		Arcs très surbaissés	1		19		*18*		1		47		*46*	
	sous conduite d'eau	Ellipses	1		1		*0*		1		1		*0*	
		Arcs assez surbaissés	1	2	1	3	*0*	*1*	1	2	1	3	*0*	*1*
		Arcs très surbaissés	»		1		*1*		»		1		*1*	
	sous chemin de fer	Pleins cintres	2		5		*3*		6		9		*3*	
		Ellipses surbaissées	1		3		*2*		1		5		*4*	
		Ellipses surhaussées	»	11	1	52	*1*	*41*	»	15	1	61	*1*	*46*
		Arcs peu surbaissés	3		16		*13*		3		16		*13*	
		Arcs assez surbaissés	5		26		*21*		5		28		*23*	
		Arcs très surbaissés	»		1		*1*		»		2		*2*	
semi-articulées	sous route		*Pas de voûtes articulées*		5	6		*6*	*Pas de voûtes articulées*		6	7		*7*
	sous ch^{in} de fer				1						1			
articulées	sous route		*avant 1880*		18	24		*24*	*avant 1880*		29	35		*35*
	sous ch^{in} de fer				6						6			

* Ces quatre ouvrages sont à 2 anneaux.

Art. 3. — Augmentation du surbaissement des voûtes de 40^{m} et plus.

Voûtes : Intrados — Voie portée			Plus grands surbaissements des voûtes de 40^{m} et plus — en 1880: Surbaiss^{t}	Pont	Tome page	en 1913: Surbaiss^{t}	Pont	Tome page
inarticulées	en ellipse	sous route	1/5	Alma	I, 153	1/5.428	Edmondson Av^{e}	I, 122
		sous ch^{in} de fer	1/3.25	Signac	I, 131	1/4.667	BigMuddyRiver	I, 225
	en arc	sous route	1/8.18	Mosca, à Turin	III, 199	1/9.52[2]	Ziegenhals	III, 208
		sous ch^{in} de fer	1/4	Maretta	III, 93	1/7	Bellows-Falls	III, 225
semi-articulées		sous route	*Pas de voûtes articulées avant 1880*			*1/10*	*Munderkingen*	IV, 55
		sous ch^{in} de fer				*1/7*	*Morbegno*	IV, 65
articulées		sous route				*1/12*	*Cornélius*	IV, 180
		sous ch^{in} de fer				*1/5.82*	*Illerbeuren*	IV, 159

1. — On n'a pas compté la voûte détruite de Trezzo (III, p. 19), les voûtes écroulées de Vieille-Brioude (II, p. 15), du Saulnier (III, p. 40).

2. — Pour des portées de moins de 40^{m}, il y a de plus grands surbaissements, aux vieux ponts de Nemours (1795-1804), de Saint-Dié sur la Meurthe (1804-1821), surbaissés à 1/15, 6 — 1/18.

M. de Dartein : « *Etudes sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », volume II : *Ponts français du XVIIIe siècle, — Centre de la France*, p. 245 à 259, Pl. 44 à 46 ; p. 261 à 270, Pl. 47 à 49.

Art. 4. — Augmentation du rayon de courbure de l'intrados au cerveau (voûtes de 40^{m} et plus).

Voûtes : Intrados — Voie portée			Plus grand rayon de courbure en 1880 — Rayon	Pont	Tome page	en 1913 — Rayon	Pont	Tome page
inarticulées	en ellipse	sous route	53.75 m	Alma	I, 153	69.28 m	Emp^{r}-François	I, 168
		sous ch^{in} de fer	35.92	Signac	I, 131	49.78	BigMuddyRiver	I, 225
	en arc	sous route	48.77	Mosca, à Turin[3]	III, 199	105	Plauen	III, 52
		sous ch^{in} de fer	25	Maretta	III, 93	52.33	Salcano	III, 141
semi-articulées		sous route	*Pas de voûtes articulées avant 1880*			*69.70*	*Munderkingen*	IV, 55
		sous ch^{in} de fer				*74*	*Morbegno*	IV, 65
articulées		sous route				*90*	*Neckarhausen*	IV, 232
		sous ch^{in} de fer				*48.25*	*Illerbeuren*	IV, 159

La voûte de Plauen a la plus grande portée, 90^{m}, et le plus grand rayon de courbure, 105^{m}.

§ 2. — *ONT FAIT PROGRESSER L'ART DES VOÛTES LES INGÉNIEURS QUI EN ONT CONSTRUIT BEAUCOUP*

On commence par copier, puis l'expérience rend hardi.

C'est à la fin de leur carrière, que de Saget[4], Garipuy[5], ont construit les beaux ponts de Lavaur[6] et de Gignac[7].

Le pont de Neuilly est le 4e pont de Perronet; le pont de la Concorde, son 10e et dernier[8].

Le pont de Gloucester est le 11e pont en maçonnerie, la 35e voûte de Telford[9].

De 1843 à 1871, Morandière a exécuté 71 grands ouvrages, ayant ensemble 509 arches[10]. C'est après 20 ans de travaux qu'il a construit les voûtes de Chalonnes et de Nantes (ellipses de 30^{m}); son plus grand viaduc, celui de Pompadour (1873-75), est son dernier[11].

Les progrès faits depuis 30 ans par l'Allemagne et par l'Autriche, on les a attribués à un calcul plus exact des efforts. N'est-ce pas, plus simplement, parce que leurs grandes voûtes ont été faites par un petit nombre d'Ingénieurs[12] ?

3. — Le rayon de l'arche d'essai de Souppes (1868) était 85^{m}496 (III, p. 375).

4. — De Dartein : « *Etudes sur les ponts en pierre remarquables par leur décoration, antérieurs au XIXe siècle* », vol. III : *Ponts français du XVIIIe siècle, — Languedoc*, p. 15 et 16.

5. — . . . . id. . . . p. 12 à 14. 6. — I, p. 97. 7. — I, p. 103.

8. — Loc. cit. renvoi 4, vol. II, *Centre de la France*, p. 9 et 10.

9. — Life of Thomas Telford (mort en 1834), Londres 1838.

10. — Morandière : « *Construction des Ponts* », préface, p. VI, VII.

11. — Ligne de Limoges à Brive. — Rapport sur la Construction, M. Dupuy, Ingénieur en chef.

12. — Sur les 49 ponts d'Allemagne qui ont des voûtes de 40^{m} et plus, 6 ont été projetés par le Président Leibbrand, 5 par M. Beutel ; les entreprises Liebold et Cie de Langebrück et d'Holzminden en ont projeté et construit 13 : l'Entreprise Sager et Wœrner de Munich, 7.

Sur les 13 ponts d'Autriche qui ont des voûtes de 40^{m} et plus, 11 ont été construits par la Direction des Chemins de fer de l'Etat.

§ 3. — *PART DE LA FRANCE*

Récapitulons les progrès depuis quelque 35 ans.
Tous sont français [13].

Articuler les voûtes, Dupuit l'avait proposé dès 1871 [14].

Partout où il y a une fissure à craindre, couper les rouleaux en tronçons et les claver au mortier sec, — méthode française [15, 16].

Construire les ponts larges sur deux minces anneaux de tête, — méthode française.

Au XVIIIe siècle, les Ingénieurs de France ont enseigné au monde l'art des ponts [17] : de ces maîtres, nous n'avons pas dégénéré.

Provisoirement, la France n'a plus la plus grande des grandes voûtes : mais elle a les plus belles, les plus diverses ; c'est elle qui en a le plus.

Elle a gardé son rang : le premier.

Paris, 29 Juin 1914.

13. — « *Der Bau kühner Steinbrücken mit grossen Spannweiten und beträchtlicher Inanspruch-* « *nahme des Materials kommt angeregt durch wohlgelungene französische Bauwerke solcher Art — auch* « *in Deutschland allmählig in Aufnahme. . . .* »

« *La construction de ponts hardis en maçonnerie de grande portée dans lesquels on fait beaucoup* « *travailler les matériaux, stimulée par le succès d'ouvrages français semblables, devient peu à peu en* « *faveur en Allemagne. . . .* »

Zeitschrift fur Bauwesen, 1888, p. 235 à 259 : « *Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen* », Leibbrand Kgl. Ober-Baurath, — Stuttgart, novembre 1887, p. 235.

14. — Tome IV, p. 26. 15. — Voir p. 163, art. 3, renvoi 44. 16. — Voir p. 163, art. 3, renvoi 45.

17. — « *E che dire delle opere pubbliche, e specialmente dei ponti? Mentre le arcate dei ponti in* « *muratura dell' epoca romana avevano una luce che raramente sorpassava i 25 metri*, la Francia che fin* « *dall' epoca del Perronet (1760), è stata maestra in fatto di costruzioni di tal genere, ha costruito negli* « *ultimi tempi dei ponti in muratura come il ponte Lavaur, il ponte Castelet, il ponte Antoinette, il ponte* « *sulla Petrusse nel Lussemburgo ed altri, nei quali ad un'arditezza straordinaria è congiunta un'ammi-* « *revole eleganza di forme* ».

C. Guidi : « *I progressi della scienza e dell'arte del costruire* », — Discorso inaugurale del 1° anno scolastico 1906-07 del R. Politecnico di Torino, p. 19 et 20.

* La voûte sphérique du Panthéon d'Agrippa a 43m de diamètre (Raynaud — *Art de bâtir*, p. 364), le dôme de Saint-Pierre 42m60 (Raynaud, *Edifices*, p. 398).



TABLE DES MATIÈRES

DU TOME V

3ME PARTIE. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN À TOUTES LES VOÛTES

TITRE I. — GRANDES VOÛTES EN PIERRE
MATÉRIAUX. — APPAREIL. — TRAVAIL *(Suite)*

CHAPITRE III. — MATÉRIAUX

CHAPITRE IV. — DISPOSITION DES MATÉRIAUX. — APPAREIL



TITRE I. — GRANDES VOÛTES EN PIERRE
MATÉRIAUX. — APPAREIL. — TRAVAIL *(Suite)*

CHAPITRE V. — TRAVAIL

TITRE II. — VOÛTES EN BÉTON

TITRE II. — VOÛTES EN BÉTON (*Suite*)

§ 5. — MODE D'EXÉCUTION DES GRANDES VOÛTES EN BÉTON.

TITRE III. — FRUIT DES TÊTES

TITRE IV. — PILES

CHAPITRE I. — DIMENSIONS ET DISPOSITIONS

TITRE IV. — PILES *(Suite)*

TITRE V. — CULÉES

CHAPITRE I. — COMMENT ON CALCULE LEURS DIMENSIONS

CHAPITRE II. — DISPOSITIONS DES CULÉES

CHAPITRE III. — MATÉRIAUX. — APPAREIL

TITRE VI. — VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE

CHAPITRE I. — VOLUME PLEIN



TITRE VI. — VOLUME ENTRE LES GRANDES VOÛTES ET LA VOIE PORTÉE *(Suite)*

CHAPITRE II. — AU-DESSUS DE QUELLES VOÛTES A-T-ON ÉVIDÉ, ET COMMENT ?

TITRE VII. — COMMENT ON RÉDUIT LA LARGEUR DES VOÛTES ENTRE TÊTES

UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT PLANCHER SUR DEUX ANNEAUX MINCES

CHAPITRE I. — POUR ÉPUISER LA RÉSISTANCE DES VOÛTES, IL FAUT EN RÉDUIRE LA LARGEUR

CHAPITRE II. — UN SEUL ANNEAU AVEC TROTTOIRS EN ENCORBELLEMENT

CHAPITRE III. — VOIE LARGE SUR DEUX ANNEAUX MINCES PORTANT UN PLANCHER



TITRE VIII. — PONT BIAIS

CHAPITRE I. — VOÛTES BIAISES

CHAPITRE II. — VOÛTES DROITES

DONT L'AXE EST OBLIQUE SUR LA RIVIÈRE OU LA VOIE TRAVERSÉE

TITRE X. — PONTS EN RAMPE, EN DOS D'ÂNE

TITRE XI. — COMMENT ON AJUSTE L'OUVRAGE AU TERRAIN

CHAPITRE I. — QUELQUES SILHOUETTES D'OUVRAGES SUR QUELQUES FORMES DE TERRAIN



TITRE XI. — COMMENT ON AJUSTE L'OUVRAGE AU TERRAIN *(Suite)*

CHAPITRE II. — OÙ ET POURQUOI ON A FAIT DES PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

CHAPITRE III. — CHOIX DE L'INTRADOS

TITRE XII. — QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS

CHAPITRE I. — ENSEMBLE DE L'OUVRAGE

TITRE XII. — QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ARCHITECTURE DES PONTS *(Suite)*

TITRE XIV. — DÉCORATION DES PONTS *(Suite)*

TITRE XIV. — DÉCORATION DES PONTS (*Suite*)

CHAPITRE V. — CULÉES. — ABORDS

LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE FONDATIONS — CINTRES — VOÛTES

TITRE I. — FONDATIONS

TITRE II. — CINTRES

CHAPITRE I. — GÉNÉRALITÉS

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE II. — CINTRES FIXES

C'EST-A-DIRE BIEN APPUYÉS SUR LE SOL ENTRE LES NAISSANCES

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE III. — CINTRES COMPLÈTEMENT RETROUSSÉS C'EST-A-DIRE NE S'APPUYANT QU'AUX NAISSANCES OU TOUT PRÈS DES NAISSANCES

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

TITRE II. — CINTRES *(Suite)*

CHAPITRE IX. — POUR UN PONT A *n* ARCHES, COMBIEN DE CINTRES ?

TITRE III. — COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE

CHAPITRE I. — ROULEAUX

CHAPITRE II. — TRONÇONS ET CLAVAGES

ON COUPE LES ROULEAUX EN TRANCHES PAR DES JOINTS VIDES PERMETTANT A LA VOÛTE DE SUIVRE, SANS CASSURES, LES MOUVEMENTS DU CINTRE; PUIS, ON MATE CES JOINTS



TITRE III. — COMMENT ON EXÉCUTE LES GRANDES VOÛTES EN MAÇONNERIE APPAREILLÉE *(Suite)*

TITRE IV. — DÉCINTREMENT *(Suite)*

LIVRE III. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS?

GRANDES VOÛTES

CLASSEMENT PAR PAYS

PLUS GRANDE VOÛTE A CHAQUE ÉPOQUE

PROGRÈS. — PART DE LA FRANCE

TITRE I. — PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS ?

CHAPITRE I. — QUELQUES GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE II. — COÛT TRÈS VARIABLE DE PREMIER ÉTABLISSEMENT DES PONTS MÉTALLIQUES COMME DES PONTS VOÛTÉS 190

CHAPITRE III. — SUPÉRIORITÉ DES PONTS EN MAÇONNERIE AU POINT DE VUE DE L'ENTRETIEN PROPREMENT DIT

CHAPITRE IV. — SUPÉRIORITÉ DES PONTS VOÛTÉS POUR RÉSISTER A DES MACHINES PLUS LOURDES

CHAPITRE V. — AVANTAGES SPÉCIAUX DES PONTS VOÛTÉS

TITRE I. — PONTS MÉTALLIQUES OU PONTS VOÛTÉS? *(Suite)*

ERRATA DU TOME V

Page 34 : au lieu de : Φ_5 — **amont**..., lire : Φ_5 — **aval**...
et au lieu de : Φ_6 — **aval**..., lire : Φ_6 — **amont**...

Page 103, dans le titre de la photographie : au lieu de :... (**Pont Ælins**)..., lire :... (**Pont Ælius**)...

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME V

3[me] PARTIE — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE I. — COMMENT ON PROJETTE UN PONT EN MAÇONNERIE

LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE

LIVRE III. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

BOURGES

IMPRIMERIE V[ve] TARDY-PIGELET ET FILS

15, RUE JOYEUSE, 15

—

1914



This bo... kept